

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE QUÍMICA

**JOÃO VICTOR LOPES DA SILVA NÉTO**

O PARADIGMA FOTOQUÍMICO E O ENSINO DE QUÍMICA

Rio de Janeiro

2020

JOÃO VICTOR LOPES DA SILVA NÉTO

## **O PARADIGMA FOTOQUÍMICO E O ENSINO DE QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Licenciatura em Química apresentado ao Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientadores: Nanci Câmara de Lucas Garden

Rodolfo Inêz Teixeira

Rio de Janeiro

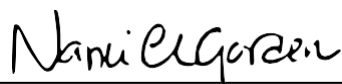
2020

**JOÃO VICTOR LOPES DA SILVA NÉTO**

**O PARADIGMA FOTOQUÍMICO E O ENSINO DE QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Licenciatura em Química apresentado ao Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Química.

Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2020.



---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Nanci Câmara de Lucas Garden  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Orientadora




---

Dr. Rodolfo Inêz Teixeira  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Orientador



---

Prof. Dr. Thiago Messias Cardozo  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Membro interno



---

Prof. Dr. José Carlos Netto-Ferreira  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Membro externo

Dedico este trabalho a todos os cientistas e  
professores, em especial aos brasileiros.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos e amados pais, Nastassja e João Carlos, por todo o amor, apoio, carinho e suporte que sempre me deram. Eu sei que vocês batalharam muito nos últimos 22 anos e que sempre presaram pelo meu melhor desde o primeiro segundo da minha existência. Não existem palavras ou números que possam mensurar o tamanho da minha gratidão, eu prometo retribuir tudo o que foi investido e dar muito orgulho a vocês dois nesta vida! Sou imensamente grato a vocês por terem me ensinado o verdadeiro valor dos estudos e por acreditarem no meu potencial. Graças a vocês estou podendo me formar profissional e intelectualmente. Graças a vocês eu sei quem eu sou, eu sei quem eu quero ser. Ao meu querido irmão, João Gabriel, pelo companheirismo de uma vida e por sempre acreditar em mim. Aos meus avós e tios por toda atenção e suporte ao longo de minha formação. Muito obrigado a todos vocês por terem me ensinado que o conhecimento é a maior riqueza que uma pessoa pode ter. Um obrigado mais do que especial à minha mãe, que já não bastasse ter me dado a minha vida e muito amor, também nutriu a minha criatividade e curiosidade desde pequeno. Você sempre me incentivou a correr atrás do meu sonho de me tornar cientista. Cientistas têm a alma e a curiosidade de uma criança, e minha mãe é pedagoga. Mãe, não há uma conquista minha neste Universo que não seja também sua, você terá sempre um lugar privilegiado no meu coração, eu te amo!

Às minhas queridas amigas Ana Carolina Stopatto e Úrsula Passos, por todo o carinho e incentivo, pela amizade de quase uma década e pelas milhares de conversas e de risadas que compartilhamos. Às minhas amigas Gabrielle Rasga e Lorena Pimenta, pelas centenas de conversas, aprendizados e pela amizade. A todos os meus professores da Educação Básica, pelo trabalho que permitiu com que eu me tornasse cidadão. Aos meus professores do Ensino Médio, em especial às professoras Ângela, Rita, Simone, Cynthia e Denise, cujo trabalho me possibilitou chegar onde eu estou hoje e por nutrirem minha curiosidade científica em Física, Biologia e Química.

Ao Douglas Freire, por ser meu melhor amigo e por estar ao meu lado desde o meu primeiro período na graduação. Muito obrigado por toda a paciência, pela ternura e por me ajudar infinitas vezes a não surtar e perder a cabeça. Tem que ter nervos de aço para aguentar as minhas crises ansiosas, aturar meus brainstorms e ouvir sobre as minhas obsessões sobre assuntos ultra específicos que talvez só umas 6 pessoas no mundo achem interessante (kkkkkkkk). Tem um trecho de uma música da P!nk que descreve exatamente como funciona isso tudo na minha mente: “And sometimes I get so tired of getting tired up in my thoughts.

You're the only one that ever makes it stop. God it hurts to be human, without you I'd be losing". É isso, sem você eu não teria sido capaz de chegar onde eu cheguei. Obrigado por tudo.

À Ligia Menezes, por ter se tornado uma das minhas melhores amigas, eu tenho muita sorte por ter te conhecido, você me acolheu com tanta doçura desde o meu primeiro período de faculdade. Obrigado por ter sido a minha melhor dupla de laboratório em tantas disciplinas experimentais, você me trouxe alegria uma infinidade de vezes, me fez rir, me fez aprender e me ajudou a não surtar. Juntos a gente sintetizou os compostos mais legais e mais lindos da Inorgexp II naquele 2018.1, fizemos o Marchiori ficar feliz que nem criança ganhando presente com aquele complexo luminescente de cobre (kkkkkk). Obrigado por termos feito o estágio de prática de ensino juntos, foi maravilhoso ter passado por essa experiência com você. Obrigado por tudo.

À Gabriela Camargo, Karol Gomes e Amanda Dornela, minhas veteranas e amigas, que me abraçaram desde as minhas primeiras semanas na UFRJ e sempre me ajudaram quando precisei. À Mariana Casal, pela amizade e por todas as conversas (inclusive as vezes que só queríamos procrastinar kkkk), eu aprendi muito com você, Mari! Obrigado por sempre ter tanta paciência para tirar as minhas dúvidas, seja de Físico-Química ou sobre a vida acadêmica! Ao Marcos Aurélio, Amir Perlin e Henrique Cerqueira pelas conversas de corredor, pelas matérias que fizemos juntos e pela amizade.

Aos vários amigos e colegas que fiz desde 2016, Giulia Manfredi, Thaissa Fontoura, Bruna França, Micaeli Louise, Vinícius Cardoso, Gustavo Henrique, Juliana Goulart, Laíssa Fernandes, Lohrene Lima, Bruno Bittar, Kelly Mendes, Felipe Ceraso, Raquel Capilla, Andressa Carvalho, Vinícius Tarouquella, Stephanie Fantinatti e Victor Lessa.

À Comissão Organizadora da Semana da Química e à professora Cássia Curan Turci, por me proporcionarem tantos aprendizados.

Ao Instituto de Química e à Universidade Federal do Rio de Janeiro, minha segunda casa. Eu devo uma parte importante de quem eu sou hoje ao IQ-UFRJ.

Ao Rodolfo Teixeira, que não só é um grande amigo e um exemplo de cientista, mas se tornou também um "irmão acadêmico" e um mentor para mim. Você é alguém em quem se espelhar. Obrigado por ter tanta paciência e me ensinar tantas coisas sobre Fotoquímica, sobre Ciência, sobre a Universidade e sobre a vida acadêmica.

Ao professor Simon John Garden, meu orientador de Iniciação Científica, e de certa forma um "pai acadêmico", com quem eu aprendi e ainda tenho tanto a aprender sobre Ciência e sobre a postura que um cientista deve ter. Você é um exemplo para mim. Eu admiro muito você e o seu trabalho, Simon.

À minha querida professora, orientadora, mentora, amiga e “mãe acadêmica”, Nanci Câmara de Lucas Garden. Obrigado por ter me acolhido como seu aluno de Iniciação Científica logo no comecinho da minha graduação, por ter sempre tanta paciência para me ensinar tanto sobre tantas coisas, desde Ciência e Fotoquímica à conselhos de vida. Obrigado por cada uma das conversas na sua sala, por todos os incentivos e estímulos que você me deu. Você tem um impacto gigantesco na minha formação enquanto pessoa e profissional. Você é a melhor orientadora do mundo! Encara o trabalho de forma responsável, mas sempre com uma veia poética, jamais perdendo o deslumbre pela Ciência e pelo Ensino. Eu tive muita sorte por encontrar uma orientadora assim, exatamente como você é. Obrigado, Nanci, eu sou muito grato por tudo que você me fez!

Obrigado aos professores Raoni Schroeder, Jussara Miranda, Tiago Lima, Renata Campos, Sebastián Bello, Grazieli Simões, Lúcia Paiva, Hugo Milward, Daniella Valle e Rodolfo Barboza. Todos vocês marcaram positivamente a minha graduação e lembro com muito carinho e gratidão das aulas que tive com cada um.

Agradeço ainda os professores Thiago Cardozo e José Carlos, pelas conversas que tivemos nos últimos anos e pelos ensinamentos que me deram em diversos momentos, pois marcaram a minha graduação. Muito obrigado por terem aceitado avaliar este meu trabalho.

Por fim, já que neste espaço eu possuo 100% de liberdade, gostaria de agradecer dois homens que me marcaram profundamente: Carl Sagan e Martyn Poliakoff. O primeiro, astrônomo, escritor e divulgador científico, teve um papel fundamental no final da minha infância e começo da adolescência, pois despertou em mim a consciência de que a Ciência é uma área absolutamente linda, que permite à Humanidade entender e conhecer a Natureza. Se hoje eu sou/desejo ser cientista é graças a ele. O segundo, químico, professor e divulgador científico, foi quem me ajudou em época de vestibular e de tomada de decisões sobre o futuro, me fez ter certeza sobre a minha escolha pela Química como profissão. Definitivamente não foi fácil para mim escolher entre a Física, Química e Biologia, eu poderia ter ido parar em qualquer uma das três, mas se hoje estou perto de me formar químico é graças ao professor Poliakoff e ao canal no YouTube Periodic Videos.

“ ‘Would you tell me, please, which way I ought to go from here?’  
‘That depends a good deal on where you want to get to,’ said the Cat.  
‘I don’t much care where –’ said Alice.  
‘Then it doesn’t matter which way you go,’ said the Cat.  
‘ – so long as I get *somewhere*,’ Alice added as an explanation.  
‘Oh, you’re sure to do that,’ said the Cat, ‘if you only walk long  
enough.’ ” – diálogo entre Alice e o Gato de Cheshire.

**Lewis Carroll, *Alice’s Adventures in Wonderland*, 1865.**



## RESUMO

As interações da matéria com as radiações eletromagnéticas são ubíquas em todo o Universo. Átomos e moléculas estão constantemente interagindo com fótons e impactando em nossas vidas por via da saúde, ambiente e tecnologias. A Fotoquímica é o ramo da Ciência que se encarrega de estudar as estruturas e as dinâmicas decorrentes da interação da luz com a matéria. De acordo com o físico e filósofo Thomas Kuhn, toda Ciência opera segundo um paradigma e para entender a evolução histórica de uma área é necessário estudar a evolução de seus paradigmas. O estado excitado é o paradigma da Fotoquímica, pois nada faz sentido nesta área sem passar por ele. No Brasil, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), documento normativo da Educação Básica nacional, determina que todo cidadão deve aprender sobre alguns fundamentos das interações entre matéria e luz. Neste trabalho, estudou-se o paradigma fotoquímico, analisou-se a evolução histórica desta área no mundo e no Brasil, com ênfase na evolução da área no Rio de Janeiro, e avaliou-se o domínio de conceitos ligados à Fotoquímica de alunos da Licenciatura em Química do Instituto de Química da UFRJ, futuros professores de Química no Ensino Básico. Além disso discutiu-se sobre o letramento científico e sobre o papel dos projetos de extensão na mediação didática do conhecimento científico. Observou-se que a Fotoquímica não tem uma data e um local exatos de surgimento, ela é o resultado de esforços coletivos de cientistas de diversas nacionalidades que viveram em momentos históricos diferentes. No Brasil, o Programa de Cooperação Internacional CNPq-NAS foi o responsável pela criação das primeiras linhas de pesquisa em Fotoquímica e pelos primeiros laboratórios desta área na UFRJ e na USP. No Rio de Janeiro, o professor David E. Nicodem foi quem deu origem a uma grande árvore genealógica fotoquímica carioca e o seu laboratório continua ativo há 50 anos. Através de um questionário, 46 alunos tiveram seus conhecimentos sobre interações entre luz e matéria avaliados, verificou-se que a maioria dos alunos possuem diversas dificuldades em assuntos básicos de Fotoquímica e Espectroscopia, algo que pode impactar em suas futuras carreiras ao trabalharem com aspectos da BNCC que demandem estes conhecimentos. Discutiu-se ainda sobre o letramento científico e o desempenho brasileiro no PISA, avaliação internacional da OCDE, verificou-se que os alunos brasileiros têm, historicamente, um desempenho fraco no exame e baixo índice de letramento científico. A sociedade e governo deverão trabalhar muito para que este cenário de analfabetismo funcional possa mudar no futuro. Cientistas deverão tornar seus métodos e resultados mais claros e acessíveis a todos e a extensão universitária oferece meios para que a Universidade se aproxime mais da sociedade, promovendo mecanismos para o intercâmbio de conhecimento entre ambas. Assim, a extensão precisa ser mais explorada, incentivada e ampliada de forma a melhorar a mediação didática do conhecimento científico com a sociedade.

**Palavras-chave:** Fotoquímica, Ensino de Química, Filosofia da Ciência, História da Ciência, Thomas Kuhn.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Competências específicas das Ciências da Natureza e suas Tecnologias da BNCC do Ensino Médio, disponíveis na página 553 do documento. ....	20
<b>Figura 2.</b> Habilidades relacionadas à competência específica 1 das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da BNCC do Ensino Médio. ....	22
<b>Figura 3.</b> Diagrama do olho humano do Livro de Óptica de Alhazen [110]. ....	48
<b>Figura 4.</b> Experimento da dupla fenda. Adaptado de Science: The definitive visual guide (2016) [110]. ....	53
<b>Figura 5.</b> Diagrama com a representação de uma onda eletromagnética. Fonte: G1 (2018). [121]. ....	56
<b>Figura 6.</b> Espectro Eletromagnético. Adaptada de: Khan Academy (2020). [135]. ....	58
<b>Figura 7.</b> Reprodução do diagrama de níveis de energia de uma molécula fosforescente, proposto por Aleksander Jablonski em 1933 na revista Nature [143]. ....	65
<b>Figura 8.</b> Diagrama de Jablonski. Adaptado de: Modern Physical Organic Chemistry [60] ....	66
<b>Figura 9.</b> Ciamician com seus balões expostos à luz solar no telhado do prédio de Química da Universidade de Bolonha [152]. ....	74
<b>Figura 10.</b> Reprodução do primeiro “Diagrama de Jablonski” da História, presente no artigo de Lewis e Kasha sobre a fosforescência e o estado tripleto. [156] ....	77
<b>Figura 11.</b> Reprodução do "Esquema de Jablonski", presente no artigo de Lewis, Lipkin e Magel. [157] ....	78
<b>Figura 12.</b> Árvore genealógica do Laboratório de Fotoquímica do Instituto de Química da UFRJ (1970-2020). ....	91
<b>Figura 13.</b> Percentual de alunos que já ouviram falar sobre determinados termos associados a Fotoquímica. ....	97
<b>Figura 15.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 6 do questionário. ....	99
<b>Figura 16.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 7 do questionário. ....	100
<b>Figura 17.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 8 do questionário. ....	100
<b>Figura 18.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 9 do questionário. ....	101
<b>Figura 19.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 10 do questionário. ....	101
<b>Figura 20.</b> Desempenho dos alunos na pergunta nº 14 do questionário. ....	104
<b>Figura 21.</b> Respostas dos alunos para a pergunta nº 15. ....	105
<b>Figura 22.</b> Respostas dos alunos para a pergunta nº 16. ....	105
<b>Figura 23.</b> Respostas dos alunos para a pergunta nº 17. ....	106
<b>Figura 24.</b> Mapa-múndi da performance em Ciências no PISA de 2018. [192] ....	109

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1. Objetivo Geral.....	10
2.2. Objetivos Específicos .....	10
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
3.1. As bases da Educação brasileira .....	11
3.2. Interações entre a luz e a matéria no Ensino de Química .....	23
3.3. Mediação didática: Para além de uma ponte entre o conhecimento científico e o conhecimento escolar.....	29
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>35</b>
4.1. Thomas Kuhn e A Estrutura das Revoluções Científicas .....	35
4.2. Da História da luz aos fundamentos da Fotoquímica .....	46
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>70</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>
6.1. Uma breve História da Fotoquímica no mundo e no Brasil .....	71
6.2. Avaliação do domínio de fundamentos de Fotoquímica e Espectroscopia por alunos da Licenciatura em Química do IQ-UFRJ.....	94
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>114</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>118</b>
<b>9. APÊNDICE.....</b>	<b>133</b>
<b>10. ANEXO.....</b>	<b>149</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A famosa frase “Este é um pequeno passo para um homem, mas um grande salto para a humanidade” (“*That’s one small step for a man, one giant leap for mankind*”), proferida pelo astronauta norte-americano Neil Armstrong quando desembarcou do módulo lunar da Apollo 11, em 20 de julho de 1969, se tornando o primeiro ser humano a pisar em solo lunar, marca um acontecimento que, mesmo se passando mais de meio século, é considerado uma das maiores conquistas da humanidade. O fato curioso, que talvez muitos não saibam, é que, atualmente, temos mais poder computacional nos nossos bolsos, com os smartphones, do que a NASA tinha na época que levou o homem à Lua [1]. Outro exemplo interessante é o das sondas espaciais Voyager 1 e Voyager 2, que fizeram parte de uma missão da NASA de visitar os quatro planetas gigantes gasosos de nosso sistema solar, usando a gravidade de cada planeta para arremessar as espaçonaves para o próximo, e desta forma podendo coletar diversos dados, como: a descoberta de que a Grande Mancha Vermelha de Júpiter é, na verdade, uma tempestade tipo ciclone 1,3 vezes maior do que a Terra; o estudo das superfícies das luas dos gigantes gasosos, descobrindo os primeiros vulcões ativos fora da Terra; em Io (uma das luas de Júpiter), observando pela primeira vez o sistema de anéis de Júpiter, descobrindo três novas luas (Thebe, Metis e Adrastea) obtendo evidências de um grande oceano de água na lua Europa; observando um padrão climático de formato hexagonal no polo norte de Saturno; 11 novas luas em Urano e a descoberta de que o campo magnético deste planeta é inclinado de tal forma que os polos estão próximos do equador, diferente da Terra, onde os polos magnéticos são quase perfeitamente alinhados com os de rotação, além de medir a temperatura dos anéis deste gigante gasoso (59 kelvin); dentre vários outros resultados [2]. As duas espaçonaves são, até então, os únicos objetos humanos na História a terem atingido o espaço interestelar, ultrapassando a Heliopausa e saindo da Heliosfera, região periférica do Sol preenchida pelo vento solar (como uma bolha protetora de partículas eletricamente carregadas e campos magnéticos produzidos pelo sol) [3]. E apesar destes feitos, nossos aparelhos eletrônicos como smartphones, tablets e notebooks contemporâneos também são computacionalmente superiores, pois a Voyager 1 e a Voyager 2 possuem juntos 139,26 kilobytes de memória, 69,63 Kb cada, enquanto um iPhone 11 (2019), em sua versão com 256 gigabytes de memória, possui 3,8 milhões de vezes mais memória do que a espaçonave Voyager, desbravadora de mundos [4]. Não só

em memória nossos smartphones são superiores, mas também em poder de processamento, a Voyager era capaz de realizar 80 mil operações por segundo [5], enquanto o iPhone 11 pode realizar até 1 trilhão de operações por segundo [6].

A humanidade evoluiu muito científica e tecnologicamente desde o surgimento do *Homo sapiens* na Terra, há cerca de 315.000 anos [7]. Vivemos a Revolução neolítica, quando abandonamos nosso estilo de vida nômade e caçador-coletor para um estilo sedentário e agrícola, isso tornou possível populações cada vez maiores, domesticamos plantas e animais e aumentamos nosso poder de influência sobre o meio onde vivemos [8]. Muitas sociedades se formaram e desapareceram ao redor do globo, do Crescente Fértil ao Egito Antigo, da Grécia Antiga ao Império Romano, da Idade Média à Sociedade Pós-Moderna atingida por meio da Revolução Científica e das Revoluções Industriais, desde então o ser humano foi se transformando, transformando a sociedade e o espaço a sua volta. Chegamos ao ponto, enquanto espécie, de podermos ser considerados uma força geológica, competindo até mesmo com forças naturais no impacto e na modificação do nosso planeta, colocando em risco não somente outras formas de vida como a nós mesmos, ultrapassando alguns limites planetários além da zona de incerteza e de alto risco [9].

Os seres humanos não são os maiores, nem os mais fortes dos animais. Não temos asas para voar, nadadeiras para nadar ou dentes e garras afiadas, não podemos sobreviver a temperaturas extremas somente com a biologia de nossos corpos, nem entrar em um estado dormente na ausência de água e alimento por dezenas, centenas ou até mesmo milhares de anos. Somos seres frágeis. Mas há uma coisa que nós temos e que sabemos usar muito bem, algo que nos colocou na posição de superpredadores na cadeia alimentar global, nossos cérebros. Somos máquinas de pensar. Diferente de outras espécies, nós dominamos a arte de pensar engenhosamente sobre os problemas, nossos hábitos sociais, a invenção das línguas para nos comunicarmos com outros humanos, nossa capacidade de criar ferramentas e pensar em formas de aperfeiçoá-las, a domesticação de outras espécies, tanto vegetais como animais, nosso poder de entender coisas abstratas e dimensionar o tempo é algo com que a Seleção Natural nos presenteou ao longo de nossa evolução. Nós podemos antever problemas e solucioná-los antes que aconteçam. É do pensamento e da inteligência humana que emana todo o nosso poder enquanto espécie neste planeta. A Ciência é mais uma de nossas várias ferramentas para compreender e transformar a realidade, certamente não é perfeita, mas talvez seja a melhor forma que temos para lidar com grandes problemas, muitos dos quais nós mesmos somos

responsáveis por ter criado, como as mudanças climáticas, extinções em massa, contaminação global por plásticos, aumento na concentração de gases nocivos à camada de ozônio e de gases de efeito estufa em nossa atmosfera, superbactérias resistentes a antibióticos, dentre tantos outros.

O conhecimento do funcionamento da Natureza nos permitiu realizar quatro revoluções industriais ao longo da História, estando a última delas, a 4ª Revolução Industrial, em curso no momento [10,11,12]. Na 1ª Revolução Industrial, que ocorreu da segunda metade do século XVIII até a metade do século XIX, fizemos uso do carvão e da Termodinâmica ao nosso favor e, através das máquinas a vapor, mecanizamos o trabalho que antes era essencialmente artesanal e lento. Na 2ª Revolução Industrial, que ocorreu entre meados do século XIX e até a primeira metade do século XX, dominamos a eletricidade e a produção de aço, aprendemos a usar o petróleo, desenvolvemos a indústria química, modernizamos os meios de transporte e avançamos nos meios de comunicação [10,12].

Inevitavelmente, as realizações de uma revolução industrial acabam levando a outra, e a 3ª Revolução Industrial surge como consequência dos avanços tecnológicos dos séculos anteriores. Ela se iniciou na segunda metade do século XX e é conhecida como a Revolução Técnico-Científica e Informacional, usou de computadores e robôes nos processos de produção, muito se avançou no campo da informática, telecomunicações, transportes, biotecnologia, nanotecnologia e robótica. O trabalho braçal humano perdeu, cada vez mais, espaço na indústria. Uma criação humana, filha desta revolução, foi a internet, peça absolutamente central no mundo contemporâneo [10,12]. A 4ª Revolução Industrial, também denominada de Indústria 4.0, está acontecendo agora e se iniciou no começo do século XXI. Tal proposta de indústria surgiu como uma necessidade de desenvolver uma maneira de fortalecer a competitividade industrial alemã. Nessa nova tendência industrial observamos a digitalização e a automação das fábricas e da sociedade. Máquinas conectadas, Internet das Coisas e dos Serviços, Impressão 3D, Inteligência Artificial, Big Data, Computação em nuvem, robótica avançada, novos materiais, integração dos sistemas máquina-biológico-digital, fundindo os mundos real e virtual [10,13]. Não é possível prever exatamente o que emergirá no mundo a partir da Indústria 4.0, mas é certo que o século XXII será drasticamente diferente. Os humanos não vão parar de pensar, de criar e de transformar, esta é a nossa natureza.

Com isso, as últimas duas décadas do século XXI trouxeram consigo diversas mudanças no estilo de vida humano. No mundo globalizado as pessoas estão mais

conectadas através da internet e as notícias já viajam o mundo em segundos. O acesso à informação está acessível como jamais fora visto na História, temos a biblioteca de Alexandria na palma de nossas mãos, todo o conhecimento já produzido apenas a distância de alguns cliques na web. Em contrapartida, o volume de informação ao qual temos acesso cresce exponencialmente e ainda não aprendemos a lidar com isso. Nesse volume de informações, as “fake news”, informações falsas com “cara de notícia”, são uma realidade e se espalham como uma pandemia, sendo um problema fruto da ignorância combinada a toda essa facilidade de conexão entre as pessoas, e da falta de conhecimento delas sobre como lidar com tanta informação, sem saber o que é verdade e o que é mentira. Os indivíduos tendem a não questionar a credibilidade da informação, a não ser que ela viole suas concepções prévias ou que sejam incentivados ao questionamento. Muitos aceitam as notícias acriticamente, pois as pessoas tendem a alinhar seus pensamentos com os valores da comunidade na qual estão inseridos. Temos um forte viés de confirmação, somos, psicologicamente, mais abertos às informações consistentes com o que já acreditamos e que nos agradam do que com informações dissonantes de nossas crenças [14].

Todo esse volume de informação só está disponível devido a invenção da World Wide Web (WWW), que se deu em 1989 pelo cientista britânico Tim Berners-Lee, que trabalhava, em Genebra, no CERN (acrônimo para Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), maior laboratório de física de partículas no mundo. A Web foi concebida e desenvolvida originalmente para atender a demanda pelo compartilhamento automatizado de informação entre cientistas de diversas universidades e institutos de pesquisa ao redor do mundo [15]. Poucos anos depois e o mundo todo estava conectado e compartilhando informações, não mais só cientistas. Hoje, a Internet das Coisas (Internet of Things, IoT), uma rede dinâmica global de informação que consiste em objetos conectados à internet, já permeia nossas vidas. Nossos smartphones são praticamente uma extensão de nossos corpos, cada dia mais objetos estão conectados à internet e a nós. Não precisamos mais estar fisicamente em algum lugar, podemos “estar” digitalmente e possuir controle remotamente sobre o espaço e sobre objetos conectados à web, através de aplicativos de celulares. Na verdade, através da IoT, já é possível hoje tornar vários objetos e ambientes “inteligentes”, como *smart wearables*, *smart homes*, *smart cities*, *smart enterprises*, *smart environment* etc [16,17,18]. Os smartphones são onipresentes, eles já nos permitiram revolucionar os sistemas de comunicação e vão revolucionar outras esferas de serviços sociais, como os sistemas de saúde mundiais. Nossos celulares são capazes de

contribuir para o tratamento remoto da saúde, oferecendo o que tantas pessoas não possuem, especialmente nos países periféricos e em desenvolvimento socioeconômico. Sua eficácia será tanto em termos de custo-benefício quanto em efetividade no sensoriamento remoto. Esta forma de entregar mais acesso à saúde ficou conhecida como “mobile healthcare (mHealth)”. Profissionais da saúde já podem, por via das tecnologias mais recentes, monitorar uma série de parâmetros fisiológicos como pressão sanguínea, nível de glicose no sangue, taxa de batimentos cardíacos, ciclos de sono e de atividade etc. Este cenário é de maior importância nos países em desenvolvimento, onde 70% dos usuários de smartphones, dentre 6,8 bilhões de pessoas, possuem acesso limitado à serviços básicos de saúde [19,20,21,22].

Quanto mais a Ciência e a Tecnologia avançam na fronteira do conhecimento, explorando o que aprendemos sobre as regras do mundo natural ao nosso favor, mais poder nós temos. Nem mesmo o Universo do muito pequeno, sob o regime da Física Quântica, escapou. Cientistas atualmente tentam desenvolver computadores quânticos, com processadores baseados em versões quânticas dos bits, os quantum bits (ou qubits), capazes de ultrapassar os limites de velocidade até de nossos supercomputadores mais velozes. Acredita-se que ainda conseguiremos atingir a chamada “supremacia quântica”, que é o potencial da computação quântica de resolver problemas que computadores clássicos não teriam a capacidade de resolver em termos práticos, como executar algoritmos que levariam muito tempo num computador clássico em um tempo razoável. Em 2019, cientistas da empresa gigante de tecnologia Google demonstraram com seu computador quântico chamado “Sycamore”, com 53 qubits, que era possível resolver em apenas 200 segundos um problema que um computador clássico levaria 10 mil anos [23]. Demonstrado que é, de fato, possível construir tais dispositivos, estes computadores têm, nos próximos anos, o potencial de provocar grandes avanços tanto na pesquisa básica e aplicada, quanto nas indústrias. Quem sabe, até uma quinta revolução industrial? Somente o tempo dirá.

Não restam dúvidas de que vivemos na era da informação, da internet e das tecnologias que fazem coisas incríveis. Também não há dúvida que, enquanto espécie neste planeta, somos extremamente poderosos e, portanto, temos grandes responsabilidades. Só foi possível chegarmos até aqui pois pensamos, pois criamos Ciência e Tecnologia para entender e moldar o mundo. Desta forma, educar cientificamente as pessoas deveria ser encarado não só como uma obrigação, mas como um ato de responsabilidade social das universidades, escolas, museus, planetários,



zoológicos e da mídia. Cientistas, professores, divulgadores científicos e jornalistas são centrais neste papel. Como o astrônomo, escritor e divulgador científico Carl Sagan disse no segundo capítulo de seu livro “O mundo assombrado pelos demônios”, ainda em 1995:

*“Divulgar a ciência – tentar tornar os seus métodos e descobertas acessíveis aos que não são cientistas – é o passo que se segue natural e imediatamente... A ciência é mais do que um corpo de conhecimento, é um modo de pensar... Nós criamos uma civilização global em que os elementos mais cruciais – o transporte, as comunicações e todas as outras indústrias, a agricultura, a medicina, a educação, o entretenimento, a proteção ao meio ambiente e até a importante instituição democrática do voto – dependem profundamente da ciência e da tecnologia. Também criamos uma ordem em que quase ninguém compreende a ciência e a tecnologia. É uma receita para o desastre. Podemos escapar ilesos por algum tempo, porém mais cedo ou mais tarde essa mistura inflamável de ignorância e poder vai explodir na nossa cara.” [24]*

No Brasil, a Educação é regida por um conjunto de leis e documentos, como a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, a Lei de diretrizes e bases da educação nacional (LDB), a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), dentre outros. Estes três serão discutidos em maiores detalhes posteriormente neste trabalho. A Constituição Brasileira de 1988 é a lei fundamental e suprema do nosso país, servindo de parâmetro de validade a todas as demais espécies normativas, ela ficou conhecida como a "Constituição Cidadã" por ter sido concebida como uma conquista da redemocratização do país, após mais de 20 anos sob um regime de ditadura militar [25]. A Lei nº 9.394/1996, LDB, como o próprio nome diz, estabelece as diretrizes e bases da educação nacional e se baseia no princípio do direito universal à educação. Ela trata de todas as esferas educacionais no Brasil, desde a Educação Infantil e do Ensino Fundamental, passando pelo Ensino Médio, pela Educação de Jovens e Adultos e Educação Profissional, a até a Educação Superior e a Educação Especial. Além disso, ela também aborda questões ligadas aos recursos financeiros e aos profissionais da educação. Já a BNCC é um documento de caráter normativo, que se aplica exclusivamente à educação escolar brasileira, que define o conjunto progressivo de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas da Educação Básica (composta pela Educação Infantil, pelo Ensino Fundamental e Ensino Médio), para que tenham

assegurados seus direitos de aprendizagem e desenvolvimento e possam exercer plena, responsável e conscientemente sua cidadania.

A Lei nº 13.415/2017 alterou a LDB, estabelecendo que o currículo do Ensino Médio será composto pela Base Nacional Comum Curricular e pelos seguintes itinerários formativos: Linguagens e suas Tecnologias, Matemática e suas Tecnologias, Ciências da Natureza e suas Tecnologias, Ciências Humanas e Sociais Aplicadas e Formação técnica e profissional [26]. São definidas “competências específicas” na BNCC para cada área do conhecimento, essas competências específicas de área do Ensino Médio orientam a proposição e o detalhamento dos itinerários formativos relativos a cada área [27]. São descritas, relacionadas a cada uma das competências, habilidades que os alunos de cada etapa devem desenvolver, além de habilidades específicas de Língua Portuguesa e Matemática, componentes obrigatórios dos três anos do Ensino Médio [28].

Dentro do itinerário do Ensino Médio de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, a BNCC introduz diversas vezes questões ligadas às interações entre a luz e a matéria, no que tange alguns fundamentos e aplicações de Fotoquímica e Espectroscopia, como por exemplo: espectro eletromagnético, efeitos biológicos das radiações ionizantes, camada de ozônio, efeito estufa e fotossíntese [27]. A BNCC, desta forma, legitima a importância de o cidadão entender cientificamente questões ligadas ao seu cotidiano no que tange as interações entre a matéria e a radiação eletromagnética.

A Fotoquímica é o ramo da Ciência que se encarrega de estudar as estruturas e as dinâmicas decorrentes da interação da luz com a matéria, ela está fundada sobre os alicerces teóricos sólidos da Química, Física e Matemática. Muito interdisciplinar, essa ciência conecta aspectos da Física, Química, Biologia, Astronomia, Meteorologia, com as Engenharias, Ciência dos Materiais, Medicina, Biotecnologia e Nanotecnologia. A Fotoquímica participa ativamente do desenvolvimento científico e tecnológico, graças a ela é possível estudar e criar substâncias para diversas finalidades, por exemplo: para melhorar a eficiência de células fotovoltaicas, tanto na captação quanto na conversão da energia luminosa incidida na Terra pelo Sol [29,30,31,32,33,34]; pode-se criar novos materiais emissores de luz como LEDs, OLEDs e *quantum dots*, com diversas aplicações que vão da saúde à tecnologia [35,36,37,38,39]; ou desenvolver novos tratamentos médicos eficientes para diversas doenças, como é o caso da Terapia Fotodinâmica, técnica baseada no uso de moléculas que absorvem luz e geram de espécies reativas de oxigênio, que destroem moléculas em meio biológico e matam as células causadoras da doença [40,41,42,43,44]; é possível criar sensores luminescentes para a análise seletiva de vários

fatores, desde metais pesados à biomoléculas [45,46,47,48,49,50]; além disso, é possível usar a luz, através da fotocatalise, para sintetizar de forma mais “verde” várias substâncias, como gerar gás H<sub>2</sub> a partir da quebra da molécula de água, ou ainda para degradar fotoquimicamente poluentes [51,52,53,54,55].

Será usado como referencial teórico neste trabalho o físico e filósofo da ciência Thomas Samuel Kuhn. Autor da grande obra “A Estrutura das Revoluções Científicas”, ele traz em seu livro uma perspectiva historicista para o estudo da Ciência, na qual se entende que ela é uma atividade concreta, desenvolvida ao longo do tempo e que, em cada período histórico, apresenta peculiaridades e características próprias, não meramente uma atividade racional, contínua e controlada, onde o conhecimento se acumularia sem rupturas, gradualmente. Segundo este enfoque historicista de Kuhn, a Ciência se desenvolve em determinadas etapas: Primeiro há o estabelecimento de um *paradigma*, após isso, se dá o surgimento da *Ciência Normal*, depois ocorre uma *Crise*, então vem a *Ciência Extraordinária*, seguida de uma *Revolução Científica* e o estabelecimento de um novo paradigma [56]. O ciclo se repete ao longo da História, e assim o conhecimento científico avança, provocando todas as consequências tecnológicas e sociais que se sucedem ao domínio de novos saberes.

Partindo-se do pressuposto que toda ciência opera segundo um paradigma central, é possível, ao se estudar, conhecer e entender esse paradigma, entender a ciência. A Fotoquímica possui o seu paradigma central, o “Santo Graal” dos fotoquímicos, que é o que norteia toda a pesquisa na área, aparecendo extensamente na literatura técnica da área [57,58,59,60,61]. E este paradigma pode ser resumido em uma pequena e simples afirmação: o estado excitado é o paradigma fotoquímico. Uma forma comum (porém não é a única) de se gerar uma espécie no estado excitado é através da absorção de luz, isso pode ser visualizado em uma equação da molécula no estado fundamental (*R*) absorvendo um fóton (*hν*) e produzindo a molécula no estado excitado (*R\**) (eq. 1).



Das reações fotoquímicas aos processos fotofísicos, a lógica por trás da Fotoquímica está fundada na existência do *estado excitado*. O paradigma fotoquímico é o paradigma do estado excitado, todos os fenômenos na Fotoquímica dependem da sua existência. Um livro de Fotoquímica importante na comunidade científica é o “Modern

Molecular Photochemistry of Organic Molecules”, dos autores Turro, Ramamurthy e Scaiano, publicado pela editora University Science Books [59]. Este livro trata de forma aprofundada sobre a área, abordando detalhadamente o paradigma fotoquímico, por este motivo, tal livro também servirá de base para a elaboração deste trabalho.

Entender o paradigma fotoquímico é de tremenda importância, pois as interações da matéria com as radiações eletromagnéticas são ubíquas, afinal vivemos em um Universo repleto de matéria e luz. Átomos e moléculas estão constantemente interagindo com fótons, impactando em nossas vidas, por via da saúde, ambiente e tecnologias. Portanto, é necessário que as pessoas compreendam alguns fundamentos da Fotoquímica e que ela se encontre presente não só nas diretrizes curriculares, mas também nos livros e materiais didáticos, em artigos voltados ao ensino de ciências, na divulgação científica e na formação de professores de ciências – especialmente dos professores de Química. Educar cientificamente a população, principalmente as próximas gerações, é um dever para que se possa propagar o conhecimento científico e formar pessoas intelectualmente autônomas e críticas em uma era dominada pela informação, pela Ciência e pela Tecnologia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Estudar o paradigma Fotoquímico e discutir sobre sua importância na sociedade.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- (a) Analisar, à luz da Filosofia da Ciência de Kuhn, a evolução histórica da Fotoquímica.
- (b) Avaliar qualitativamente o domínio de conceitos, ligados às interações entre a luz e a matéria, de um grupo de alunos do curso de Licenciatura em Química do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ-UFRJ) através de um questionário com questões objetivas e discursivas.
- (c) Avaliar a importância de se ensinar conceitos fundamentais da Fotoquímica na Educação Básica e o papel da extensão universitária na mediação didática do conhecimento científico fotoquímico para o conhecimento escolar.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. As bases da Educação brasileira

A Constituição Brasileira de 1988 discorre diversas vezes sobre a Educação no país, servindo de base para que instituições e profissionais possam nortear seus trabalhos na construção de uma nação democrática e mais justa, onde todos os cidadãos tenham seus direitos assegurados. Conforme o Art. 6º deste documento, a educação faz parte de um dos direitos sociais assegurados a todos os brasileiros [62]. Em seu Art. 205, a Constituição afirma: *“A educação, direito de todos e dever do Estado e da família, será promovida e incentivada com a colaboração da sociedade, visando ao pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho.”* [62], deixando claro que a formação das próximas gerações é um empreendimento conjunto do governo, da família e da sociedade, e que todos têm seu papel para assegurar este direito social fundamental.

No artigo seguinte, 206, são levantados oito princípios básicos da educação brasileira, falando sobre o acesso e a permanência na escola, a gratuidade do ensino público, a valorização dos profissionais da educação, a garantia do padrão de qualidade etc. Dentre alguns dos deveres do Estado com a educação, vale destacar alguns como a garantia de educação básica obrigatória e gratuita dos 4 aos 17 anos de idade do cidadão, assegurada inclusive sua oferta gratuita para todos que a ela não tiveram acesso na idade própria; o atendimento educacional especializado aos portadores de deficiência; o atendimento ao educando, em todas as etapas da educação básica, por meio de programas suplementares de material didático-escolar, transporte, alimentação e assistência à saúde; e o acesso aos níveis mais elevados de ensino da pesquisa e da criação artística, segundo a capacidade de cada um [62].

Já no seu Art. 210, a Constituição garante que serão fixados conteúdos mínimos para o ensino fundamental, visando garantir uma formação básica comum, respeitando valores culturais e artísticos, nacionais e regionais. Também está escrito no capítulo que trata especificamente da Educação que atividades de pesquisa, de extensão e de estímulo e fomento à inovação realizadas por universidades e/ou por instituições de educação profissional e tecnológica podem receber apoio financeiro do Poder Público [62]. Visando sempre conduzir ao desenvolvimento social, o país deve se preocupar em assegurar a manutenção e o desenvolvimento do ensino em seus diversos níveis, etapas e

modalidades, através de medidas legais e de ações integradas dos poderes públicos das diversas esferas (federal, estadual e municipal). A nação brasileira tem o dever de erradicar o analfabetismo, universalizar o atendimento escolar, melhorar a qualidade do ensino, formar adequadamente seus cidadãos para o trabalho e há de conduzir a promoção humanística, científica e tecnológica nacional [62].

Com a promulgação da Constituição de 1988, a LDB anterior (4024/61) foi considerada obsoleta, dando início a um grande debate para instituir uma nova lei que norteasse o ensino brasileiro. Em 1996 o debate foi concluído e a Lei nº 9.394 foi sancionada, pelo então presidente da república Fernando Henrique Cardoso e pelo ministro da educação Paulo Renato Souza, no dia 20 de dezembro e publicada no Diário Oficial da União no dia 23/12/1996. A Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional de 1996 possui 92 artigos, que definem e regulam toda a organização estrutural da Educação no Brasil, com base nos princípios presentes na Constituição [63].

A LDB, já em seus dois primeiros artigos, fala sobre a natureza, os princípios e a finalidade da educação:

*“Art. 1º. A educação abrange os processos formativos que se desenvolvem na vida familiar, na convivência humana, no trabalho, nas instituições de ensino e pesquisa, nos movimentos sociais e organizações da sociedade civil e nas manifestações culturais.” [63]*

*“Art. 2º. A educação, dever da família e do Estado, inspirada nos princípios de liberdade e nos ideais de solidariedade humana, tem por finalidade o pleno desenvolvimento do educando, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho.” [63]*

Em seu artigo nº 21, ela é clara ao descrever que a estrutura educacional brasileira é dividida em “Educação Básica” – composta pelas etapas da Educação Infantil, do Ensino Fundamental e do Ensino Médio – e em “Ensino Superior”. Baseado nos artigos 29, 30, 32 e 35 da LDB, a estrutura geral da Educação Básica se organiza da seguinte forma, conforme pode ser visto na Tabela 1:

**Tabela 1.** Estrutura da Educação Básica brasileira.

	<b>Etapas da Educação Básica</b>	<b>Duração</b>	<b>Finalidade</b>
<b>Educação Infantil</b>	Inicial	Oferecido em creches, para de crianças de até 3 anos e pré-escolas para crianças de 4 a 5 anos.	Desenvolvimento integral da criança de até 5 anos em seus aspectos físico, psicológico, intelectual e social
<b>Ensino Fundamental</b>	Intermediária	É obrigatório, com duração de 9 anos, gratuito na escola pública, iniciando aos 6 anos de idade.	Formação básica do cidadão, mediante o desenvolvimento da capacidade de aprender, tendo como meios básicos o pleno domínio da leitura, da escrita e do cálculo; a compreensão do ambiente natural e social, do sistema político, da tecnologia, das artes e dos valores em que se fundamenta a sociedade; o desenvolvimento da capacidade de aprendizagem, tendo em vista a aquisição de conhecimentos e habilidades e a formação de atitudes e valores; o fortalecimento dos vínculos de família, dos laços de solidariedade humana e de tolerância recíproca em que se assenta a vida social.
<b>Ensino Médio</b>	Final	Duração mínima de 3 anos.	Consolidação e o aprofundamento dos conceitos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos; a preparação para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores; o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico; a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.

Outro ponto muito importante da LDB é levantado no artigo nº 26 e no seu primeiro parágrafo, onde se fala sobre a necessidade de uma base nacional comum para os



currículos no país, onde se abranjam os estudos da língua portuguesa, da matemática, da natureza e da sociedade:

*“Art. 26. Os currículos da educação infantil, do ensino fundamental e do ensino médio devem ter base nacional comum, a ser complementada, em cada sistema de ensino e em cada estabelecimento escolar, por uma parte diversificada, exigida pelas características regionais e locais da sociedade, da cultura, da economia e dos educandos.*

*§ 1º Os currículos a que se refere o caput devem abranger, obrigatoriamente, o estudo da língua portuguesa e da matemática, o conhecimento do mundo físico e natural e da realidade social e política, especialmente do Brasil.” [63]*

No que diz respeito ao Ensino Médio, a LDB diz posteriormente, no Art. 35-A e no Art. 36, que ele será definido pela Base Nacional Comum Curricular. Ela definirá os objetivos e os direitos de aprendizagem dos estudantes, e será dividida em quatro grandes áreas do conhecimento e por itinerários formativos:

*“Art. 35-A. A Base Nacional Comum Curricular definirá direitos e objetivos de aprendizagem do ensino médio, conforme diretrizes do Conselho Nacional de Educação, nas seguintes áreas do conhecimento:*

*I – linguagens e suas tecnologias;*

*II – matemática e suas tecnologias;*

*III – ciências da natureza e suas tecnologias;*

*IV – ciências humanas e sociais aplicadas.*

*§ 1º A parte diversificada dos currículos de que trata o caput do art. 26, definida em cada sistema de ensino, deverá estar harmonizada à Base Nacional Comum Curricular e ser articulada a partir do contexto histórico, econômico, social, ambiental e cultural.” [63]*

*“Art. 36. O currículo do ensino médio será composto pela Base Nacional Comum Curricular e por itinerários formativos, que deverão ser organizados por meio da oferta de diferentes arranjos curriculares, conforme a relevância para o contexto local e a possibilidade dos sistemas de ensino, a saber:*

*I – linguagens e suas tecnologias;*

*II – matemática e suas tecnologias;*

*III – ciências da natureza e suas tecnologias;*

*IV – ciências humanas e sociais aplicadas;*

*V – formação técnica e profissional” [63]*

Nos artigos 43, 44 e 45 a LDB começa a descrever o Ensino Superior, suas grandes finalidades, o que ele deve abranger e onde será ministrado:

*“Art. 43. A educação superior tem por finalidade*

*I – estimular a criação cultural e o desenvolvimento do espírito científico e do pensamento reflexivo;*

*II – formar diplomados nas diferentes áreas de conhecimento, aptos para a inserção em setores profissionais e para a participação no desenvolvimento da sociedade brasileira, e colaborar na sua formação contínua;*

*III – incentivar o trabalho de pesquisa e investigação científica, visando o desenvolvimento da ciência e da tecnologia e da criação e difusão da cultura, e, desse modo, desenvolver o entendimento do homem e do meio em que vive;*

*IV – promover a divulgação de conhecimentos culturais, científicos e técnicos que constituem patrimônio da humanidade e comunicar o saber através do ensino, de publicações ou de outras formas de comunicação;*

*V – suscitar o desejo permanente de aperfeiçoamento cultural e profissional e possibilitar a correspondente concretização, integrando os conhecimentos que vão sendo adquiridos numa estrutura intelectual sistematizadora do conhecimento de cada geração;*

*VI – estimular o conhecimento dos problemas do mundo presente, em particular os nacionais e regionais, prestar serviços especializados à comunidade e estabelecer com esta uma relação de reciprocidade;*

*VII – promover a extensão, aberta à participação da população, visando à difusão das conquistas e benefícios resultantes da criação cultural e da pesquisa científica e tecnológica geradas na instituição;*

*VIII – atuar em favor da universalização e do aprimoramento da educação básica, mediante a formação e a capacitação de profissionais, a realização de pesquisas pedagógicas e o desenvolvimento de atividades de extensão que aproximem os dois níveis escolares.” [63]*

*“Art. 44. A educação superior abrangerá os seguintes cursos e programas:*

*I – cursos sequenciais por campo de saber, de diferentes níveis de abrangência, abertos a candidatos que atendam aos requisitos estabelecidos pelas instituições de ensino, desde que tenham concluído o ensino médio ou equivalente;*

*II – de graduação, abertos a candidatos que tenham concluído o ensino médio ou equivalente e tenham sido classificados em processo seletivo;*

*III – de pós-graduação, compreendendo programas de mestrado e doutorado, cursos de especialização, aperfeiçoamento e outros, abertos a candidatos diplomados em cursos de graduação e que atendam às exigências das instituições de ensino;*

*IV – de extensão, abertos a candidatos que atendam aos requisitos estabelecidos em cada caso pelas instituições de ensino.” [63]*

*“Art. 45. A educação superior será ministrada em instituições de ensino superior, públicas ou privadas, com variados graus de abrangência ou especialização.” [63]*

A LDB também discorre extensamente sobre as universidades serem instituições pluridisciplinares de formação de quadros profissionais de nível superior, de pesquisa, extensão, de domínio e cultivo do saber humano. A elas é assegurada autonomia em dez atribuições, que vão desde à criação, organização e extinção de cursos; estabelecer projetos de pesquisa, produção artística e atividades de extensão; conferir graus, diplomas e outros títulos; firmar contratos, acordos e convênios; administrar seus rendimentos conforme previsto na constituição, nas leis e nos respectivos estatutos; dentre outros. Cabe à União assegurar, anualmente, em seu Orçamento Geral, recursos suficientes para manutenção e desenvolvimento das instituições de educação superior por ela mantidas [63]. A Universidade é a casa do conhecimento humano, elas estão entres as instituições mais importantes de um país, reunindo a totalidade do saber em um lugar, também é delas que emana o poder de uma nação.

A formação de docentes no Brasil pode ser diferente, de acordo com a etapa da Educação a que se está referindo. Para aqueles que se dedicarão a atuar em qualquer da esfera básica, a formação será em cursos superiores de pedagogia ou de licenciatura plena. Entretanto, a formação daqueles que venham a se dedicar apenas à educação infantil ou até aos 5 primeiros anos do ensino fundamental, a formação pode ser aquela oferecida na modalidade “normal” em nível médio. Todos os currículos para a formação de docentes da esfera básica terão por referência a Base Nacional Comum Curricular. Já a preparação para o exercício do magistério superior é realizada a nível de pós-graduação, prioritariamente em programas de mestrado e doutorado [63].

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) é uma peça central na busca do país por uma aprendizagem de qualidade, especialmente no Ensino Médio, no qual os índices de aprendizagem, repetência e abandono são preocupantes. A BNCC é um documento completo e contemporâneo, elaborado por especialistas de todas as áreas do conhecimento, e busca corresponder às demandas para o preparo dos estudantes dessa época para o futuro. O texto referente ao Ensino Médio foi concluído após amplos debates com os educadores e com a sociedade civil e política, ele possibilitará dar sequência ao

trabalho de adequação dos currículos regionais e das propostas pedagógicas das escolas públicas e particulares do Brasil. Com a BNCC, espera-se garantir o conjunto de aprendizagens essenciais aos estudantes, o seu desenvolvimento integral por meio das competências gerais da Educação Básica, apoiando os alunos nas suas escolhas e concretização de seus projetos de vida e da continuidade de seus estudos. Vale ressaltar que a BNCC, por si só, não será a responsável por alterar o quadro de desigualdade brasileiro presente na Educação básica, mas ela é fundamental para que a mudança tenha um início, pois além de influenciar os currículos, influenciará a formação inicial e continuada dos docentes, na produção de materiais didáticos e nas avaliações e exames nacionais que serão revistos à luz do texto homologado. Dito isso, cabe também aos professores e pesquisadores, enquanto membros da sociedade civil, fazerem parte deste processo de busca pelo compromisso de equidade social no Brasil [27].

Garantir a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no Ensino Fundamental é essencial na etapa final da Educação Básica, uma vez que se objetiva formar adequadamente os cidadãos que atuarão futuramente na sociedade, que comporão a força de trabalho do país, que serão os futuros profissionais da saúde, educação e segurança; que serão os futuros artistas, os futuros cientistas e que terão o papel de dar continuidade ao desenvolvimento humano, mas enfrentando desafios contemporâneos. Para atingir isso, é necessário ter a sólida convicção de que todos os estudantes são capazes de aprender e de alcançarem seus objetivos, independentemente de suas características pessoais e de seus diferentes percursos e histórias. O Ensino Médio, além de preparar o estudante para a cidadania e aprimorá-lo como pessoa, deve garantir a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos, do funcionamento da sociedade e do sistema político e dos processos produtivos, articulando as diferentes áreas do conhecimento [28].

Conforme previsto em lei, a BNCC do Ensino Médio se organiza em continuidade ao proposto para as etapas anteriores da Educação Básica. As aprendizagens essenciais, definidas neste documento, estão organizadas pelas áreas de conhecimento: Linguagens e suas Tecnologias, Matemática e suas Tecnologias, Ciências da Natureza e suas Tecnologias e Ciências Humanas e Sociais Aplicadas. Para cada área do conhecimento são definidas *competências específicas*, estas devem orientar a proposição e o detalhamento de *itinerários formativos* relativos a cada área. Ainda relacionado às competências, são descritas *habilidades* a serem desenvolvidas pelos estudantes nesta etapa do ensino. As competências e habilidades da BNCC constituem a *formação geral*

*básica*. Os currículos do Ensino Médio são constituídos pela formação geral básica, articulada de forma indissociável aos itinerários formativos [28].

No Ensino Fundamental, a área de Ciências da Natureza propõe aos estudantes a investigação de características, fenômenos e processos relativos ao mundo natural e tecnológico, explorando alguns de seus conceitos fundamentais, promovendo os cuidados pessoais e como outro, o compromisso com a sustentabilidade e o exercício da cidadania. No Ensino Médio, a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias estimula o aprofundamento e a ampliação dos conhecimentos explorados na etapa anterior. Trata a investigação como forma de engajamento dos estudantes na aprendizagem de processos, práticas e procedimentos científicos e tecnológicos, e promove o domínio de linguagens específicas, o que permite aos estudantes analisar fenômenos e processos, utilizando modelos e fazendo previsões. Dessa maneira, possibilita aos estudantes ampliar sua compreensão sobre a vida, o nosso planeta e o universo, bem como sua capacidade de refletir, argumentar, propor soluções e enfrentar desafios pessoais e coletivos, locais e globais [64].

Através do conhecimento científico e das tecnologias que dele derivam, a sociedade sofreu vastas mudanças. É fácil enumerar exemplos da presença da Ciência na vida dos seres humanos contemporâneos, da eletricidade que abastece as cidades mundo afora aos combustíveis dentro de motores a explosão, dos semicondutores nos processadores de smartphones, tablets e computadores às vacinas, a internet ou os fertilizantes. Toda a estrutura mundial no século XXI se sustenta sobre os pilares da Ciência e da Tecnologia. É indispensável na formação de qualquer cidadão aprender sobre as ciências naturais básicas, Física, Química e Biologia, pois somente assim se poderá participar de debates envolvendo as grandes questões, como desmatamento e incêndios florestais, mudanças climáticas, pandemias, energia nuclear, uso de transgênicos e agrotóxicos na agricultura etc [64].

Dentro da própria estrutura das ciências, os conhecimentos são sistematizados em leis, teorias e modelos, fazendo uso de gráficos, diagramas e, muitas vezes, da linguagem matemática e de experimentos, a fim de sistematizar e entender o mundo natural. A BNCC diz que é importante desenvolver no estudante do Ensino médio o pensamento científico. Ela propõe nesta etapa um aprofundamento nas temáticas *Matéria e Energia*, *Vida e Evolução* e *Terra e Universo*. Os conhecimentos conceituais associados a esses assuntos fornecem a base que permite aos alunos investigar, analisar e discutir situações-problema que emergem de diferentes contextos socioculturais, além de compreender e

interpretar leis, teorias e modelos, aplicando-os na resolução de problemas individuais, sociais e ambientais [64]. A Base também afirma que a contextualização social, histórica e cultural da ciência e tecnologia é fundamental para que elas sejam compreendidas como um empreendimento humano e social. Ela propõe a discussão do papel do conhecimento científico na organização social, nas questões ambientais, na saúde humana e na formação cultural, ou seja, as relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. Além disso, ela também estimula a comparação de explicações científicas distintas, propostas em períodos históricos diferentes, por cientistas de diferentes sociedades e culturas, a fim de se reconhecer os limites explicativos das ciências, dando oportunidades para que os estudantes compreendam a dinâmica da construção do conhecimento científico, que ele não é necessariamente linear. Essa contextualização dos conhecimentos deve ser mais do que a mera exemplificação de conceitos e fatos em situações cotidianas. A aprendizagem deve estimular o protagonismo dos alunos no enfrentamento de questões sobre o consumo, energia, segurança, saúde, ambiente etc. [64].

É válido destacar o seguinte trecho retirado da página 549, da parte de Ciências da Natureza e suas tecnologias da BNCC do Ensino Médio, no qual se observa dentre os exemplos ligados à temática “Matéria e Energia” estão as interações entre a matéria e a energia luminosa:

*“Em Matéria e Energia, no Ensino Médio, diversificam-se as situações-problema, referidas nas competências específica e nas habilidades, incluindo-se aquelas que permitem a aplicação de modelos com maior nível de abstração e que buscam explicar, analisar e prever os efeitos das interações e relações entre matéria e energia (por exemplo, analisar matrizes energéticas ou realizar previsões sobre a condutibilidade elétrica e térmica de materiais, sobre o comportamento dos elétrons frente à absorção de energia luminosa, sobre o comportamento dos gases frente a alterações de pressão ou temperatura, ou ainda sobre as consequências de emissões radioativas no ambiente e na saúde).” [64]*

A BNCC reconhece como fundamental que os estudantes se apropriem da linguagem científica, pois aprender tais linguagens, por meio de seus códigos, símbolos, nomenclaturas e gêneros textuais é parte do processo de letramento científico do cidadão, tal como é aprender sobre o uso de ordens de grandeza, de unidades de medidas, ou como são obtidos e analisados criticamente os dados na Ciência. Deve-se garantir que os alunos

aprendam a usar corretamente a terminologia de conceitos e processos (como dissolução, oxidação, radiação, magnetismo, evolução, equilíbrio, entropia, luminescência etc.). Todas essas perspectivas de ensino de ciências se encontram na BNCC do Ensino Médio dentro das competências específicas e habilidades da área. As três competências podem ser lidas na Figura 1.



**Figura 1.** Competências específicas das Ciências da Natureza e suas Tecnologias da BNCC do Ensino Médio, disponíveis na página 553 do documento.

Das três competências, a que mais se adequa ao escopo deste trabalho, não somente por ser a mais ligada à Química é a primeira, por este motivo a ela será dado enfoque. Esta competência geral propõe a análise de fenômenos naturais e de processos tecnológicos baseados nas interações entre a matéria e a energia. Apesar disso, todo professor e futuro professor de ciências do Ensino Médio deve ser familiar às três e às suas habilidades que cada uma traz consigo. Sobre ela, a BNCC diz na página 554:

*“Nessa competência específica, os fenômenos naturais e os processos tecnológicos são analisados sob a perspectiva das relações entre matéria e energia, possibilitando, por exemplo, a avaliação de potencialidades, limites*

*e riscos do uso de diferentes materiais e/ou tecnologias para tomar decisões responsáveis e consistentes diante dos diversos desafios contemporâneos. Dessa maneira, podem-se estimular estudos referentes a: estrutura da matéria; transformações químicas; leis ponderais; cálculo estequiométrico; princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento; ciclo da água; leis da termodinâmica; cinética e equilíbrio químicos; fusão e fissão nucleares; espectro eletromagnético; efeitos biológicos das radiações ionizantes; mutação; poluição; ciclos biogeoquímicos; desmatamento; camada de ozônio e efeito estufa; desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de obtenção de energia elétrica; processos produtivos como o da obtenção do etanol, da cal virgem, da soda cáustica, do hipoclorito de sódio, do ferro-gusa, do alumínio, do cobre, entre outros. Também é importante ressaltar que as diferentes habilidades relacionadas a esta competência podem ser desenvolvidas com o uso de dispositivos e aplicativos digitais, que facilitem e potencializem tanto análises e estimativas como a elaboração de representações, simulações e protótipos.” [64].*

Mais uma vez, fica evidente a importância dada pela BNCC a assuntos englobados pela Fotoquímica e pela Espectroscopia. Isso se reforça ao ler no bloco das habilidades relacionadas a esta competência, Figura 2.



HABILIDADES
<b>(EM13CNT101)</b> Analisar e representar, com ou sem o uso de dispositivos e de aplicativos digitais específicos, as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia e de movimento para realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos que priorizem o desenvolvimento sustentável, o uso consciente dos recursos naturais e a preservação da vida em todas as suas formas.
<b>(EM13CNT102)</b> Realizar previsões, avaliar intervenções e/ou construir protótipos de sistemas térmicos que visem à sustentabilidade, considerando sua composição e os efeitos das variáveis termodinâmicas sobre seu funcionamento, considerando também o uso de tecnologias digitais que auxiliem no cálculo de estimativas e no apoio à construção dos protótipos.
<b>(EM13CNT103)</b> Utilizar o conhecimento sobre as radiações e suas origens para avaliar as potencialidades e os riscos de sua aplicação em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica.
<b>(EM13CNT104)</b> Avaliar os benefícios e os riscos à saúde e ao ambiente, considerando a composição, a toxicidade e a reatividade de diferentes materiais e produtos, como também o nível de exposição a eles, posicionando-se criticamente e propondo soluções individuais e/ou coletivas para seus usos e descartes responsáveis.
<b>(EM13CNT105)</b> Analisar os ciclos biogeoquímicos e interpretar os efeitos de fenômenos naturais e da interferência humana sobre esses ciclos, para promover ações individuais e/ou coletivas que minimizem consequências nocivas à vida.
<b>(EM13CNT106)</b> Avaliar, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais, tecnologias e possíveis soluções para as demandas que envolvem a geração, o transporte, a distribuição e o consumo de energia elétrica, considerando a disponibilidade de recursos, a eficiência energética, a relação custo/benefício, as características geográficas e ambientais, a produção de resíduos e os impactos socioambientais e culturais.
<b>(EM13CNT107)</b> Realizar previsões qualitativas e quantitativas sobre o funcionamento de geradores, motores elétricos e seus componentes, bobinas, transformadores, pilhas, baterias e dispositivos eletrônicos, com base na análise dos processos de transformação e condução de energia envolvidos – com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais –, para propor ações que visem a sustentabilidade.

**Figura 2.** Habilidades relacionadas à competência específica 1 das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da BNCC do Ensino Médio.

Dentre as habilidades associadas à competência específica 1, a que se relaciona com as interações luz-matéria mais evidentemente a é a habilidade (EM13CNT103). Ela abre espaço para a discussão dos efeitos da radiação e suas aplicações. Neste sentido, estão englobadas questões como reações fotoquímicas (como na visão, na síntese da vitamina D, reações de fotocicloadição das bases nitrogenadas no DNA, que podem ocasionar em mutações e, eventualmente, cânceres de pele); protetores solares; aplicações da luz no

tratamento de doenças, como a Terapia Fotodinâmica; células fotovoltaicas e energia solar; LEDs e até processos fotocatalíticos de grande potencial industrial na síntese de materiais e remédios [57,58,61].

Na habilidade (EM13CNT104) também é possível discutir sobre alguns aspectos da Fotoquímica e da Espectroscopia. Diversas tecnologias podem ser nocivas à saúde e ao ambiente, por exemplo as lâmpadas fluorescentes, cujo descarte inadequado pode gerar poluição por metais pesados, principalmente pelo mercúrio [65]; também é possível falar sobre o uso de protetores solares e como as moléculas presentes nestes cosméticos têm impactado recifes de corais e outras formas de vida marinha provocando morte de ecossistemas inteiros [66,67,68]; ou das telas de smartphones, cujas telas com alto brilho e alta intensidade de luz azul são capazes de interferir na produção de melatonina, impactando no ciclo circadiano e provocando problemas de insônia [69].

### 3.2. Interações entre a luz e a matéria no Ensino de Química

As interações entre a matéria e a radiação eletromagnética compõem uma gama de assuntos abordados dentro do Ensino de Química na Educação Básica, é comum que os fundamentos de Espectroscopia e de Fotoquímica estejam sempre associados de maneira interdisciplinar a temas envolvendo tecnologia, meio ambiente ou saúde [70,71,72,73,74]. Seja em trabalhos de pós graduação de Ensino de Ciências [75,76], em artigos de Ensino de Química [77,78], em congressos [79,80], em questões de grandes vestibulares [81,82], ou em livros didáticos do Ensino Médio [83,84,85]. É uma temática muito trabalhada e que ainda tem muito o que crescer na Educação.

Em seu artigo “A Nanotecnologia das Moléculas”, o professor do Instituto de Química da USP, Henrique Toma, trata sobre a tecnologia em escala nanométrica, aborda diversas aplicações de reações fotoquímicas em tecnologias para o armazenamento de memória, na criação de máquinas moleculares movidas à luz, de dispositivos moleculares luminescentes (como OLEDs e *quantum dots*) e sobre materiais fotovoltaicos. Ele reforça que tudo isso não pode deixar de ser incluído na Educação, visto que os estudantes de hoje estarão amanhã no mercado de trabalho usufruindo de tecnologias com base em princípios da Nanotecnologia, da Fotoquímica e da Espectroscopia [70].

Aos docentes que buscam uma atividade experimental como estratégia para motivar seus alunos no aprendizado da Química, envolvendo-os em um projeto onde se desenvolva não só o aprendizado das interações entre a luz e a matéria, mas que também

mostre a eles a interdisciplinaridade de diversas áreas da Ciência, podem fazer como os autores Oliveira e Leite, cujo trabalho envolveu a construção de um fotômetro de baixo custo no Ensino Médio [71,75]. Além da construção do equipamento, para o qual podem ser trabalhadas habilidades socioemocionais e cognitivas, que fazem parte de qualquer trabalho em grupo, uma vez construído o fotômetro, o professor e seus alunos podem realizar uma série de experimentos com o equipamento, permitindo abordar vários temas que vão desde espectro eletromagnético e estrutura atômica a até as interações entre a luz e a matéria e o estudo das concentrações de soluções.

Outro tema pertinente é o da Química Ambiental na Educação Básica, que também perpassa pelas interações dos gases com as radiações eletromagnéticas. Professores devem estar sempre atentos a este assunto, por ser de grande relevância na formação de cidadãos conscientes, além de serem abordados frequentemente na mídia, servindo de assuntos motivadores na sala de aula. Efeito estufa, mudanças climáticas, camada de ozônio, são importantes de serem tratados nesta etapa da educação, a Fotoquímica e a Espectroscopia auxiliam, neste momento, na compreensão das reações de fotólise do ozônio, sob ação da luz UV, e das vibrações moleculares dos gases de efeito estufa, provocadas pela radiação IV [72,73].

Ao se ensinar sobre moléculas conjugadas e seu uso como corantes em uma aula de Química Orgânica, sobre indicadores coloridos em uma aula sobre ácidos, bases e pH; ou sobre transições eletrônicas em cátions nos fogos de artifício, em uma aula sobre estrutura atômica, professores podem aprofundar mais sobre o que são as cores e qual a sua origem, como se dá a interação da luz com os átomos e com as moléculas na escala do mundo quântico, podem levantar também aspectos históricos e sociais das cores na sociedade e podem falar ainda sobre a física e a biologia por trás do fenômeno da visão [74,78,86].

Em se tratando de avaliações em larga escala, como grandes vestibulares nacionais, prestados por milhares de estudantes, é comum cobrarem dos alunos o domínio de algumas habilidades básicas das Ciências da Natureza associadas à interpretação de gráficos, figuras e de raciocínio lógico-matemático para a resolução do problema. As questões exigem dos alunos leitura atenta do texto base, a interpretação deste texto e das figuras apresentadas. Normalmente, não são cobrados conhecimentos específicos, nem a utilização de conhecimentos avançados para se chegar à alternativa correta. Exemplos de questões assim, que abordam interação entre a luz e a matéria, foram retiradas do ENEM e da FUVEST e são apresentadas nas Figuras A1 e A2 no anexo deste trabalho [81,82].

O Exame Nacional do Ensino Médio é uma prova anual, realizada desde 1998 pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), vinculado ao Ministério da Educação do Brasil. Ele é um parâmetro importante, pois é utilizado para avaliar a qualidade do Ensino Médio no país, seus resultados possibilitam o desenvolvimento de estudos e de indicadores da educação nacional. Além disso, as notas de suas 180 questões mais a da redação compõem a média dos candidatos às vagas de cursos de ensino superior, oferecidas em universidades públicas em todo o Brasil e em algumas instituições de ensino superior portuguesas [87]. Nos últimos três anos, na prova de Ciências da Natureza e suas Tecnologias do ENEM foram cobradas questões ligadas às interações luz-matéria, que podem ser vistas nas Figuras A3 – A11 no anexo [81].

Currículo e Avaliação andam lado a lado. Aquilo que o primeiro dita, a segunda verifica. BNCC e ENEM trabalharão conjuntamente na implementação do novo Ensino Médio brasileiro. Ao cobrar dos estudantes uma noção básica de conceitos ligados a interação luz-matéria e habilidades de interpretação de textos, figuras e gráficos, o ENEM evidencia a importância deste tema da Educação Básica.

Nos livros de Química do Ensino Médio, tradicionalmente nos capítulos dedicados aos modelos de estrutura atômica, também se observa a presença de alguns conceitos básicos sobre Espectroscopia com os quais os estudantes devem se familiarizar. Alguns chegam a ir além de átomos e luz e falar sobre moléculas e luz, de fenômenos luminescentes como a fluorescência e a fosforescência, mas nunca em um grau elevado de profundidade, apenas citando os fenômenos como uma curiosidade.

Em seu sexto capítulo do livro “Química na abordagem do cotidiano”, Tito e Canto tratam da estrutura atômica e ensinam aos estudantes sobre conceitos como: espectro da luz visível, espectro de linhas, níveis de energia, estado fundamental, transição eletrônica e, como uma curiosidade, falam de luminescência, fluorescência, fosforescência e bioluminescência [84]. No bloco de curiosidades, o texto sobre luminescência é o seguinte:

*“Alguns materiais, quando absorvem radiação ultravioleta ou outras formas de radiação, emitem de volta luz visível.*

*Esse fenômeno é chamado genericamente de **luminescência**. Quando a emissão ocorre imediatamente após a incidência da radiação ultravioleta, o fenômeno é chamado de **fluorescência**; se, por outro lado, a emissão demorar alguns segundos ou até mesmo algumas horas, chamamos de **fosforescência**.*

*Os interruptores de luz e os ponteiros de relógio que brilham no escuro baseiam-se no princípio da fosforescência.*

*Os interruptores feitos de material fosforescente são visíveis no escuro graças ao retorno gradual dos elétrons que foram excitados durante o tempo em que o dispositivo esteve iluminado.” [84]*

Dentro da seção “3. Algumas aplicações do modelo de Bohr” há um subitem “3.4 Bioluminescência: a luz dos vagalumes” cujo texto se encontra a seguir:

*“Alguns seres vivos possuem um interessante mecanismo em seu organismo: reações químicas utilizam a energia (proveniente dos alimentos) para excitar elétrons de alguns átomos. Quando os elétrons voltam ao estado fundamental, há emissão de luz. Esse fenômeno é chamado de **bioluminescência**. O caso mais conhecido de bioluminescência é o dos vagalumes (ou pirilampus).*

*Os químicos já conseguiram reproduzir em laboratório as reações de bioluminescência como aquelas responsáveis pela luz emitida pelos vagalumes.” [84]*

Já a autora Martha Reis, no capítulo 11 de seu livro “Química: Ensino Médio”, aborda sobre a evolução dos modelos atômicos. Na seção “3. Investigação da natureza da luz”, ela discute detalhadamente aspectos físicos e históricos da luz até chegar ao modelo atômico de Bohr. Ela descreve sobre os embates da natureza da luz. Fala sobre alguns cientistas e filósofos, como Isaac Newton e René Descartes, terem defendido a teoria corpuscular da luz; e sobre o astrônomo e matemático Christiaan Huygens defender a teoria ondulatória da luz. Ela trata dos fenômenos ópticos reflexão, refração, propagação retilínea. Traz uma descrição física de ondas, como os conceitos de comprimento de onda ( $\lambda$ ), amplitude, frequência ( $f$ ) e velocidade ( $v$ ) (inclusive mostrando a equação que relaciona características ondulatórias:  $f = v/\lambda$ ). Reis fala ainda sobre o físico e matemático James Clerk Maxwell ter proposto um modelo para explicar a natureza da luz, no qual ela seria uma onda eletromagnética, formadas por campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si e à direção de propagação da radiação. Após isso, ela trata da teoria do físico e matemático Max Karl Ernest Ludwig Planck, que admitiu que a energia não era contínua como se pensava [83].

*“Os corpos aquecidos emitem radiação não sob a forma de ondas, mas sob a forma de pequenos ‘pacotes’ de energia denominados **quantum**, ou seja, a energia é descontínua.*

*Max Planck supôs que cada **quantum** equivalia a uma quantidade definida de energia, proporcional à frequência da radiação.*

*De acordo com a teoria dos quanta (o plural de quantum é quanta), a energia não se propaga como fluxo contínuo, mas na forma de quanta ou ‘pacotes de energia’. Atualmente, um quantum de energia radiante é denominado **fóton**.”*

[83]

Em seguida a autora fala a dualidade onda-partícula. Parte, em seguida, para os espectros dos elementos, fala sobre espectros de emissão e de absorção de elementos químicos, sobre o uso da Espectroscopia na análise da luz emitida por estrelas, da descoberta do Hélio no Sol, fala também sobre níveis de energia, sobre estado fundamental e estados excitados e sobre transições eletrônicas. No começo do capítulo seguinte, “capítulo 12 – Modelo básico do átomo”, Martha ainda trata sobre poluição eletromagnética e sobre radiação ionizante ser aquela que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, sendo capaz de danificar células do corpo humano e causar doenças como o câncer, e mostra um gráfico com os tipos de radiação (ionizante e não ionizante), a forma que cada uma é produzida, seus efeitos na matéria, seus comprimentos de onda e as aplicações de cada uma [83].

Por fim, no livro “Ser Protagonista: Química”, de Lisboa, Bruni, Nery, et. al., são tratados no capítulo “5. Modelos atômicos e características dos átomos” alguns conceitos ligados à interação luz-matéria, como a “fluorescência do sulfeto de zinco” na ampola de Crookes que permitiu a descoberta dos raios catódicos, sobre o espectro eletromagnético e a decomposição da luz branca em suas componentes, sobre as radiações eletromagnéticas e suas propriedades físicas (comprimento de onda, frequência e velocidade), espectro de emissão, energia quantizada, níveis de energia, estado excitado e estado fundamental [85]. Em dois blocos de curiosidades, os autores tratam sobre alguns fenômenos luminescentes:

*“Por que alguns objetos emitem luz no escuro?*

*Pulseiras luminescentes são exemplos de objetos que brilham no escuro.*

*Alguns tipos de interruptores de luz, brinquedos, pulseiras e colares distribuídos em festas parecem brilhar como se tivessem luz própria.*

*Trata-se do fenômeno da luminescência, que é visualmente atraente e desperta a curiosidade de pessoas de todas as idades. Na verdade, o que acontece é um processo de excitação eletrônica, seguida da emissão de luz na faixa do espectro visível.*

*A excitação eletrônica é promovida por uma fonte de energia externa. Ao retornar ao estado fundamental, pode ocorrer a emissão de luz na forma de **fluorescência** ou **fosforescência**.*

*De maneira simplificada, pode-se dizer que a diferença entre o fenômeno de fluorescência e o de fosforescência reside no tempo de emissão de luz.*

*Na fluorescência, a emissão de luz cessa quando a fonte de energia é desligada. Na fosforescência, essa emissão pode durar horas (é o que acontece com o interruptor de luz no qual a luz visível possui energia suficiente para promover a excitação eletrônica).” [85]*

#### **“A bioluminescência e o modelo de Rutherford-Bohr**

*O processo de emissão de luz dos vagalumes é denominado bioluminescência, que nada mais é do que uma emissão de luz visível por organismos vivos.*

*A bioluminescência também é observada em outras espécies de insetos, de algas, de peixes, de bactérias e de fungos.*

*Em todo o mundo existem aproximadamente 2 mil espécies de vagalumes, das quais cerca de quinhentas podem ser encontradas no Brasil, o país com maior biodiversidade desses insetos.*

*Assim como na luminescência, a bioluminescência é resultado de um processo de excitação eletrônica, cuja fonte de excitação provém de uma reação química que ocorre no organismo vivo.*

*De forma simplificada, podemos dizer que no organismo do vagalume existe uma substância responsável pela emissão de luz, denominada genericamente **luciferina**. Na presença de ATP (trifosfato de adenosina) e da enzima **luciferase**, a luciferina reage com oxigênio. A reação libera energia suficiente para formar o produto – oxiluciferina – no estado eletronicamente excitado, que emite luz ao retornar ao estado fundamental (estado de menor energia).”*

*[85]*

Conceitos básicos de Fotoquímica e de Espectroscopia fazem parte do corpo de conhecimentos abordado pelos livros didáticos, mas somente tangenciando os assuntos com nomes e explicações básicas e simplificadas. Com a cobrança progressiva dos vestibulares e a implementação da BNCC do Ensino Médio, é possível que futuramente estes conhecimentos relativos as interações luz-matéria ganhem mais espaço e

protagonismo na Educação Básica, talvez não ficando somente como curiosidades e sim em capítulos próprios.

### 3.3. Mediação didática: Para além de uma ponte entre o conhecimento científico e o conhecimento escolar

O campo da Filosofia que investiga as questões ligadas ao conhecimento se chama “Teoria do Conhecimento”. Costuma-se definir o conhecimento como sendo *o modo pelo qual o sujeito se apropria intelectualmente do objeto*. Entende-se o conhecimento de duas formas, como *ato* ou como *produto*. Etimologicamente falando, a palavra “conhecimento” deriva do latim e significa “ato de conhecer”. O ato diz respeito à relação estabelecida entre o sujeito que conhece com o objeto conhecido – podendo este objeto ser algo externo ou interno a mente do sujeito, como fenômenos naturais, sociais ou psicológicos. Já o produto do conhecimento é a resultante do ato de conhecer, em outras palavras, é o conjunto de saberes acumulados e recebidos pela cultura e os saberes por nós acrescentados à ela, como valores, crenças, técnicas, artes, ciências, filosofia, etc [88].

O conhecimento científico é uma conquista recente da História, até Galileu Galilei e Isaac Newton a Ciência e a Filosofia eram vinculadas, ambas só vieram a se dissociar no século XVII com a Revolução Científica [89]. As Ciências Modernas nasceram ao determinarem seus objetos de estudo e criarem métodos rigorosos, através dos quais estabelecem o controle sistemático da aquisição do conhecimento, permitindo a descoberta de relações universais entre os fenômenos. Sobre as conclusões a que os cientistas chegam, elas são avaliadas pelos seus pares, membros da sua comunidade intelectual (comunidade científica), pessoas letradas nos mesmos conhecimentos e rigores específicos da área, sendo encarregados de examinar criticamente os resultados [88]. Os gregos, Platão e Aristóteles, já hierarquizavam o conhecimento em *episteme* (conhecimento construído metodologicamente, de caráter científico), *techne* (conhecimento técnico, prático) e *doxa* (opinião, crença, senso comum) [90,91]. O conhecimento científico é sistemático e empiricamente controlável, por este motivo ele rompe com a opinião e com o senso comum, que é uma forma de conhecimento assistemática que nos situa no cotidiano. A Ciência, mais do que apenas um corpo de conhecimentos, traz consigo uma maneira de pensar sistematicamente sobre a realidade [88].



Os conhecimentos são perpetuados na sociedade através do processo educativo, no qual conteúdos culturais, científicos, linguísticos, artísticos, e valores são selecionados, explicita e implicitamente, para constituírem o currículo escolar por serem considerados necessários às gerações mais novas. O conhecimento escolar é um grande conjunto de fatores epistemológicos, ideológicos e históricos selecionados pela sociedade para educar a próxima geração [92].

O conhecimento científico, enquanto uma forma metódica do saber, busca explicar sistematicamente a ordem dos fenômenos naturais ou sociais e a Ciência, assim como outras formas de saber, faz uso de uma linguagem técnica própria, ela frequentemente usa da linguagem lógico-matemática para explicar seus conceitos de forma rigorosa, por isso precisa passar uma série de adequações antes de chegar aos alunos e para que eles possam se apropriar desses conhecimentos. O conhecimento não deve chegar no seu estado puro aos estudantes, uma vez que muitas vezes é o primeiro contato deles com o assunto e a linguagem técnica seria um grande obstáculo, a linguagem aplicada pela Ciência não é a mesma linguagem aplicada em sala de aula. Isso também não significa dizer que se deve distorcer o conhecimento e torná-lo errado em prol da didática. O conhecimento que se comunica aos membros da comunidade científica deve ser adaptado para ser comunicado ao aprendiz leigo. O conhecimento a ser levado para a sala de aula há de ser didaticamente adaptado para a atividade educativa, transformado em conhecimento escolar e incorporado no currículo [93].

Alguns autores denominam o processo de adaptação do conhecimento científico para conhecimento escolar como *transposição didática* [93]. Este termo foi enunciado pela primeira vez em 1975 pelo sociólogo francês Michel Verret em sua tese de doutorado “*Le temps des études*”. A transposição didática tem por base tornar os saberes selecionados transmissíveis e assimiláveis, para isso se exige um trabalho de reestruturação do conhecimento científico. É a partir disso que emerge o conhecimento escolar, com marcas capazes de transcender os limites da escola. Posteriormente, em 1982, o termo foi analisado no âmbito do ensino de Matemática pelos pesquisadores Yves Chevallard e Marie-Albert Joshua, em um artigo a respeito da transposição da noção matemática de distância. Foram examinadas as transformações do conceito entre a sua elaboração por Fréchet, em 1906, e o momento de sua introdução nos programas franceses de ensino de geometria, em 1971. Os autores concluem que o conhecimento escolar não é uma reprodução exata do conhecimento científico [93,94].

A transposição didática seria composta por três momentos distintos: o *savoir savant* (saber do sábio, que é elaborado pelos cientistas), o *savoir enseigner* (saber a ensinar, que é a parte que compete aos professores, relacionada à didática e ao ensino em sala de aula) e o *savoir enseigné* (saber ensinado, que é aquele que foi absorvido pelo aluno mediante a transposição didática feita pelos cientistas e professores). É um processo dependente do *Zeitgeist*, uma vez que depende de diversos fatores como momento histórico e político, ideologias dominantes no corrente contexto social, novas descobertas científicas e teorias pedagógicas vigentes [93].

A transposição didática se dá na transição do *savoir savant* ao *savoir enseigner*, passando por uma estrutura abstrata imaginada por Chevallard, a *noosfera*, o território onde ocorre o jogo de forças existente no processo da transposição do conhecimento científico ao conhecimento escolar. É possível entender a noosfera de Chevallard como uma esfera do pensamento, marcada por disputas e negociações de grupos políticos e sociais, onde se encontram os interesses de políticos, pesquisadores, educadores, pais, empresários, autores e editoras de livros didáticos, todos debatendo sobre os ideais formativos para os cidadãos, o desenvolvimento dos alunos, dentre outros assuntos. Ao final desses debates é determinado o formato do conhecimento escolar [95,96,97].

É importante ressaltar que o conceito de noosfera proposto por Chevallard não é o mesmo que fora proposto anteriormente por outros pensadores, como aquele proposto pelo geoquímico russo Vladimir Vernadsky. A noosfera de Vernadsky é a esfera do pensamento humano e seria a próxima etapa do desenvolvimento da Terra, após a geosfera e a biosfera. Para ele, a esfera da razão emerge da esfera da vida e possui o poder de reestruturar o planeta e a vida através do pensamento científico e do trabalho humano organizado. O russo era otimista quanto às habilidades humanas de enfrentar desafios e acreditava que a noosfera representava o potencial humano de atuar em papel geológico importante na Terra [98,99].

Há autores, como a química e educadora Alice Ribeiro Casimiro Lopes, professora titular da Faculdade de Educação da UERJ, que defendem que o termo transposição didática não representa adequadamente o processo de reconstrução do saber na escola, pois tende a ser associado à ideia de reprodução, movimento de transportar de um lugar a outro, sem alterações. Desta forma, o conhecimento escolar é ensinado como um saber sem produtor, sem origem, sem lugar, transcendente ao tempo. Livros didáticos, componentes essenciais da noosfera de Chevallard, frequentemente omitem aspectos históricos do conhecimento científico, retirando a produção daquele conhecimento de seu

contexto histórico, social e político. Alice sugere que uma forma mais adequada de se referir ao processo de adequação do conhecimento científico seria *mediação didática*. Não no sentido genérico da ação de relacionar duas ou mais coisas, servindo como uma ponte que permite a passagem de uma coisa à outra, mas sim no sentido dialético, como um processo de constituição da realidade através de mediações contraditórias e de relações não imediatas [94]. Em seu artigo sobre o processo de mediação didática da Ciência ela diz:

*“Na Química, um exemplo que caracteriza esse processo claramente é o tratamento conferido à estrutura atômica. Os princípios da Mecânica Quântica passam a ser discutidos no ensino brasileiro a partir da década de 50, como uma das consequências do processo de inovação educacional do ensino de ciências ocorrido no pós-guerra que, entre outros aspectos, divulgou no país os projetos americanos para o ensino de Ciências. A apropriação de conceitos como orbital ou de princípios como o de Heisenberg, feita por livros didáticos, banalizou-os de tal modo que assumiram significados completamente díspares em relação aos originais. A Mecânica Quântica, que originalmente rompe com concepções realistas da ciência e estabelece uma descontinuidade com o mundo macroscópico, é transmitida como essencialmente realista e esquemática. O processo de distribuição eletrônica, que possui um significado fundamental para compreensão da estrutura molecular, passa a ser considerado no ensino médio como uma espécie de jogo: conhecidas as regras de preenchimento dos orbitais, nada mais fácil do que neles ‘colocar’ os elétrons.” [94]*

Ela aponta que ensinamos apenas o produto, o resultado, e não ensinamos sobre o processo histórico de construção daquele conhecimento, retirando-o de seu contexto e do conjunto de problemas que o originaram. Tudo em prol de um “didatismo”, um modismo didático que considera necessário chegar no abstrato a partir do concreto, a fim facilitar a assimilação do conceito, somente reforçando o senso comum. A Ciência funciona justamente rompendo com o senso comum, ao invés de construir modelos que permitam a compreensão do *modus operandi* da racionalidade científica, tenta-se aproximar o conhecimento científico do senso comum, fatalmente distorcendo este conhecimento [94].

No ensino da Química, a aproximação com o senso comum costuma se dar no uso de metáforas realistas e analogias mal feitas, constituindo obstáculos epistemológicos e

pedagógicos, produzindo um hiato entre a comunidade científica e a comunidade escolar, não obtendo êxito na aprendizagem. Todavia, derrubar o uso inadequado de metáforas no ensino de ciências não é uma tarefa trivial. O senso comum é uma luz que ilumina o mundo real, mas que, inevitavelmente, sempre projeta sombras. A *doxa* é um obstáculo à *episteme*, o ato de conhecer sempre se dá contra o conhecimento anterior [100].

Como o filósofo francês Gaston Bachelard, que muito contribuiu para a epistemologia, levanta em seu livro “A formação do espírito científico”, o espírito científico proíbe que tenhamos um conhecimento vulgar provisório, uma opinião sobre questões que não se compreende e que não sabemos formular com clareza. Problemas na Ciência não são formulados espontaneamente, todo conhecimento é a resposta para uma pergunta, nada é gratuito e evidente, tudo é sistematicamente construído. No primeiro capítulo de seu livro, ele introduz o conceito de obstáculo epistemológico como uma causa da inércia ao progresso do conhecimento, são obstáculos inerentes ao desenvolvimento do conhecimento científico, que tentam mascarar a ruptura entre os conhecimentos, se comportando como resistências à racionalidade. Já os obstáculos pedagógicos são associados às travas que impedem professores de entenderem o porquê dos alunos não aprenderem determinado assunto, as razões que os fazem resistir ao aprendizado de um conceito [100]. Neste capítulo o autor diz:

*“A ciência, tanto por sua necessidade de coroamento como por princípio, opõe-se absolutamente à opinião. Se, em determinada questão, ela legitimar a opinião, é por motivos diversos daqueles que dão origem à opinião; de modo que a opinião está, de direito, sempre errada. A opinião pensa mal; não pensa: traduz necessidades em conhecimentos. Ao designar os objetos pela utilidade, ela se impede de conhecê-los. Não se pode basear nada na opinião: antes de tudo, é preciso destruí-la. Ela é o primeiro obstáculo a ser superado.”* [100]

Muitos professores de ciências não têm noção da existência dos obstáculos epistemológicos e dos obstáculos pedagógicos. Bachelard aponta que muitas vezes o educador não tem o “senso do fracasso” justamente pela cultura de se achar um mestre. Quem ensina manda. A relação psicológica professor-aluno é muitas vezes patogênica. Ele aponta que a fecundidade e a disseminação de um conceito científico são proporcionais ao seu poder de sofrer deformações, conferindo risco de perda de compreensão com os conceitos originais. É necessário ensinar e esclarecer ideias

abstratas, pois a abstração é uma habilidade que faz parte do pensamento científico. Segundo suas palavras “*a Ciência é a estética da Inteligência*” [100].

Analogias podem ser ferramentas poderosas nas estratégias de ensino, caso seus aspectos metafóricos sejam devidamente considerados. Elas podem ser usadas cuidadosamente, de modo a tornar compreensíveis estruturas abstratas, tornando o não-familiar em familiar. A linguagem analógica estabelece proporções e permite comparar sistemas, ela pode englobar o uso de comparações e metáforas, mas deve-se ter cautela pois na metáfora se assume que o destinatário não irá distorcer o conhecimento e fará as relações de equivalência corretas [94].

Alice Lopes ressalta que existem semelhanças entre os processos cognitivos das revoluções científicas e da aprendizagem por mudança conceitual. Professores precisam desconstruir concepções cotidianas de senso comum no processo de ensino-aprendizagem. A História da Ciência traz exemplos de como técnicas de abstração, como analogias e experimentos de pensamento, são centrais tanto na construção de novas representações científicas da realidade, quanto nas comunicações destas aos membros da comunidade científica. As técnicas de abstração são importantes no ensino aprendizagem pois são a base da construção do conhecimento científico [94].

É função da escola educar, disseminar o conhecimento e tornar o conhecimento científico acessível a todos da sociedade. Apesar de ensinar ciências ser uma tarefa desafiadora, é também uma necessidade, e fazer uso de linguagem técnica sem mediação torna a Ciência obscura e inacessível a muitos, não permitindo a propagação e a geração de novos conhecimentos.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Thomas Kuhn e A Estrutura das Revoluções Científicas

Thomas Samuel Kuhn (18 de julho de 1922 – 17 de junho de 1996) nasceu em Cincinnati, Ohio, nos Estados Unidos da América. Aos 18 anos, em 1940, foi aceito pela Universidade de Harvard, onde estudou Física e obteve seu bacharelado (1943), mestrado (1946) e doutorado (1949). Durante a Segunda Guerra Mundial, imediatamente após se graduar, ele trabalhou no *Radio Research Laboratory*, sob a supervisão do físico e matemático John Hasbrouck Van Vleck (ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1927), neste período Kuhn realizou pesquisas sobre o uso de radares e foi mandado para a Inglaterra, para a França e para inspecionar instalações de radar na Alemanha. Sua pós-graduação só teve início após o fim da guerra, ele realizou seu trabalho de pesquisa na área de Física do Estado Sólido, também sob a orientação de Van Vleck, sobre a energia de coesão de metais monovalentes, inclusive publicando três artigos sobre física. Mas foi na Filosofia da Ciência que Kuhn viria a se destacar, se tornando um dos mais influentes na área no século XX [101,102].

Em setembro de 1948, o jovem Kuhn foi nomeado “Junior Fellow” na *Harvard Society of Fellows*, durante este período ele estudou muito sobre História e Filosofia da Ciência e decidiu que estas seriam seu campo de pesquisa e ensino, áreas que até então ele sabia pouco a respeito. Quando seu período de “Junior Fellowship” acabou em 1951, ele foi nomeado para ser instrutor no programa de educação geral de Harvard e, em 1952, professor assistente de educação geral e de história da ciência. Um de seus cursos sobre a revolução copernicana para o programa de ciências naturais o levaria mais tarde a publicar seu primeiro livro, intitulado “A Revolução Copernicana”. Em 1954, ele recebeu a “Guggenheim Fellowship” para começar a trabalhar em um projeto chamado “A Estrutura das Revoluções Científicas”. Em 1956, a Universidade da Califórnia, Berkeley, ofereceu ao Kuhn uma vaga de professor assistente de História da Ciência no departamento de História e Filosofia. Pouco antes de se mudar para a Califórnia, seu livro “A Revolução Copernicana” foi aceito pela *Harvard University Press*, sendo publicado pela primeira vez em 1957. Ele acreditava que após a publicação deste livro, rapidamente completaria seu outro trabalho, mas isso não foi possível porque durante seu primeiro ano como professor em Berkeley ele estava imerso em atividades de ensino e de pesquisa em

História da Ciência. Em 1958, Kuhn foi promovido ao cargo de professor associado de seu departamento e se dedicou a completar sua monografia sobre as Revoluções Científicas, mas ele demorou um ano para terminar o esboço do primeiro capítulo, porém dedicou muito de sua atenção na formulação de conceitos, como o que ele chamou de *paradigma*, para descrever a prática da *ciência normal*. Ele reconheceu posteriormente que este foi um passo essencial do trabalho e afirmou que os capítulos restantes vieram mais rapidamente. No ano seguinte ele completou o esboço da obra inteira e submeteu a versão final para a “The University of Chicago Press”. Em 1962, foi publicado seu segundo livro, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, e em 1970 uma segunda edição desta obra, pois Kuhn adicionou um posfácio ao seu livro comentando sobre questões levantadas desde a publicação original. A literatura sobre os assuntos levantados por ele cresceu muito desde então, influenciando muitos filósofos e cientistas. *A Estrutura das Revoluções Científicas* foi traduzido para mais de 20 idiomas e vendeu mais de um milhão de cópias [101,102].

Acerca de Kuhn e de sua obra, o filósofo e professor da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, André Luís de Oliveira Mendonça, diz:

*“Sem correr o risco de estar exagerando, Kuhn se tornou a figura, senão mais influente, ao menos mais debatida na filosofia da ciência anglófona da segunda metade do século XX. A grande quantidade de trabalhos sobre ele que, nos últimos anos, continua sendo publicada é um forte indício da atualidade de suas ideias, bem como da influência duradoura de sua obra. Seu livro, A estrutura das revoluções científicas (1978 [1962]), que completa 50 anos, é o maior best-seller da história da epistemologia, tendo causado uma verdadeira ‘revolução’ nas questões filosóficas referentes à ciência.”* [103]

Além de Harvard (1951–1956) e UC Berkeley (1956–1964), o físico e filósofo foi professor de História e Filosofia da Ciência também na Princeton University (1964–1979) e no Massachusetts Institute of Technology (1979–1991). Ele publicou outras obras, como “A Tensão Essencial” (1977) e “Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity” (1978), que não foi traduzido para a língua portuguesa [104].

*A Estrutura das Revoluções Científicas* se tornou um grande marco no estudo do desenvolvimento da Ciência. Neste trabalho Kuhn revolucionou a Filosofia da Ciência porque rompeu com a visão de que todo o progresso científico se dá como um processo gradual e cumulativo de aquisição de conhecimento. Ele introduziu uma distinção entre

dois tipos de desenvolvimento científico, o “normal” e o “revolucionário”, no primeiro se encontram a maioria das pesquisas científicas, que seguem a imagem habitual e mais cumulativa de ciência, onde são produzidos “tijolos” que a pesquisa adiciona ao crescente acervo do conhecimento científico, enquanto no segundo se encontram os episódios de desenvolvimento bastante diferentes, e de certa forma problemáticos, pois não podem ser acomodados nos limites dos conceitos que estavam em uso, provocando alterações nas formas de pensar e descrever fenômenos naturais.

No seu livro, Kuhn define *ciência normal* da seguinte forma:

*“Neste ensaio, ‘ciência normal’ significa a pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações passadas. Essas realizações são reconhecidas durante algum tempo por alguma comunidade científica específica como proporcionando os fundamentos para sua prática posterior. Embora raramente na sua forma original, hoje em dia essas realizações são relatadas pelos manuais científicos elementares e avançados. Tais livros expõem o corpo da teoria aceita, ilustram muitas (ou todas) das suas aplicações bem-sucedidas e comparam essas aplicações com observações e experiências exemplares.”*  
[56]

O autor argumenta em seu livro que a ciência normal opera segundo o que ele chamou de *paradigmas*, eles determinam quais questões são relevantes de serem levantadas, quais são as metodologias para os experimentos a serem realizados na solução dos problemas e como serão os padrões de solução aceitos pelos cientistas daquela comunidade. Ele explica que os paradigmas são “*realizações suficientemente sem precedentes para atrair um grupo de partidários, afastando-os de outras formas de atividade científica dissimilares*” e são realizações simultaneamente “*suficientemente abertas para deixar que toda espécie de problemas fosse resolvida pelo grupo redefinido de praticantes da ciência*” [56].

Para ele, o que prepara o estudante para se tornar membro de uma comunidade científica, na qual atuará mais tarde, é o estudo dos paradigmas da comunidade. Os paradigmas são o resultado da abordagem historicista do Kuhn no estudo do desenvolvimento científico, são eles que possibilitam a instauração da pesquisa especializada pela comunidade científica, pois estabelecem consenso acerca dos fundamentos que norteiam as suas práticas. A ciência normal, portanto, é uma modalidade de ciência onde todos os cientistas membros de uma determinada comunidade trabalham



segundo um paradigma comum. Mendonça e Videira resumem a relação entre o paradigma e a ciência normal:

*“A rigor, a ciência normal calcada no paradigma instaura o consenso nos três principais níveis da pesquisa. De fato, sob a égide de um paradigma, uma certa comunidade científica não discute mais sobre quais fatos devem ser investigados, quais métodos a serem empregados e o que se aceita como soluções. Em suma, ao praticar a ciência normal, os pesquisadores lidam – de maneira homogênea – com as questões ontológicas, metodológicas e epistemológicas.” [105]*

Em trecho do primeiro capítulo de seu livro, ele descreve, através de um exemplo histórico da Óptica, que na transição de um paradigma a outro se tem um fenômeno de evolução da Ciência que ele chama de *revolução científica*:

*“A aquisição de um paradigma e do tipo de pesquisa mais esotérico que ele permite é um sinal de maturidade no desenvolvimento de qualquer campo científico que se queira considerar... Os manuais atuais de física ensinam ao estudante que a luz é composta de fótons, isto é, entidades quanto-mecânicas que exibem algumas características de ondas e outras de partículas. A pesquisa é realizada de acordo com esse ensinamento, ou melhor, de acordo com as caracterizações matemáticas mais elaboradas a partir das quais é derivada essa verbalização usual. Contudo, essa caracterização da luz mal tem meio século. Antes de ter sido desenvolvida por Planck, Einstein e outros no começo do século XX, os textos de física ensinavam que a luz era um movimento ondulatório transversal, concepção que em última análise derivava dos escritos ópticos de Young e Fresnel, publicados no início do século XIX. Além disso, a teoria ondulatória não foi a primeira das concepções a ser aceita pelos praticantes da ciência óptica. Durante o século XVIII, o paradigma para esse campo de estudos foi proporcionado pela Óptica de Newton, a qual ensinava que a luz era composta por corpúsculos de matéria. Naquela época os físicos procuravam provas da pressão exercida pelas partículas de luz ao colidir com corpos sólidos, algo que não foi feito pelos primeiros teóricos da concepção ondulatória. Essas transformações de paradigmas da óptica física são revoluções científicas e a transição sucessiva de um paradigma a outro, por meio de uma revolução, é o padrão usual de desenvolvimento de uma ciência amadurecida.” [56]*

Kuhn argumenta diversas vezes ao longo do livro que a ciência normal é um empreendimento que visa refinar, ampliar e articular o paradigma já existente e por este motivo ela não pode corrigi-lo. Apesar do mundo não mudar após uma mudança de paradigma, depois dela o cientista passa a trabalhar em um mundo diferente, porque o que ocorre durante a revolução científica não é totalmente redutível a uma mera reinterpretação dos dados conhecidos. A revolução científica é uma transição de um paradigma antigo a um novo, é um episódio na História da Ciência quando se tem um desenvolvimento não cumulativo. Seja Copérnico com a Astronomia Ptolomaica, Galileu com a Dinâmica Aristotélica ou Lavoisier com a Química de Priestley, cientistas que abraçaram novos paradigmas ao longo da História passaram a olhar o mundo através de lentes inversoras, se defrontando com a mesma constelação de objetos que antes, e conscientes disso, mas os encontrando totalmente transformados. Guiados por novos paradigmas, cientistas adotaram novos instrumentos e direcionaram seus olhares para novas direções, por isso é possível entender as revoluções científicas como um fenômeno de deslocamento total da rede conceitual através da qual os cientistas veem o mundo.

Kuhn explica que as diferenças entre paradigmas sucessivos são necessárias e irreconciliáveis, eles ensinam coisas diferentes. Paradigmas são as fontes dos métodos, das áreas problemáticas e dos padrões de solução aceitos por qualquer comunidade científica amadurecida de qualquer área, portanto, com a recepção de um novo paradigma há uma redefinição da ciência. Problemas que antes seriam tidos como triviais ou irrelevantes podem se tornar centrais, revoluções científicas mudam os problemas e os padrões de solução deles. Sobre isso Kuhn afirma: “*A tradição científica normal que emerge de uma revolução científica é não apenas incompatível, mas muitas vezes verdadeiramente incomensurável com aquela que a precedeu.*”, por isso que se diz que os cientistas trabalham em um mundo diferente após uma revolução [56]. Ele dá diversos exemplos para embasar seus argumentos, em várias áreas, como na Astronomia, na Física e na Química, um deles pode ser lido em um trecho do capítulo 9 destacado a seguir:

*“Alterações dessa espécie não estão restritas à astronomia e à eletricidade. Já indicamos algumas das transformações de visão similares que podem ser extraídas da história da química. Como dissemos, Lavoisier viu oxigênio onde Priestley viu ar desflogistizado e outros não viram absolutamente nada. Contudo, ao aprender a ver o oxigênio, Lavoisier teve também que modificar sua concepção a respeito de muitas outras substâncias familiares. Por exemplo, teve que ver um mineral composto onde Priestley e seus*

*contemporâneos haviam visto uma terra elementar. Além dessas, houve ainda outras mudanças. Na pior das hipóteses, devido à descoberta do oxigênio, Lavoisier passou a ver a natureza de maneira diferente. Na impossibilidade de recorrermos a essa natureza fixa e hipotética que ele ‘viu de maneira diferente’, o princípio de economia nos instará a dizer que, após ter descoberto o oxigênio, Lavoisier passou a trabalhar em um mundo diferente.”*  
[56]

Ele questiona como surgiriam os períodos de revoluções científicas, uma vez que a ciência normal não tem por natureza romper com o paradigma vigente. A ciência normal não visa à novidade, ela tende a descobrir o que já se esperava pelo paradigma. Apesar de não ser um empreendimento que se dirige para as novidades, a ciência normal pode ser bastante eficaz em provocá-las. Kuhn afirma que isso começa com o reconhecimento que a natureza violou as expectativas paradigmáticas que governam a ciência normal, a descoberta de uma *anomalia*. Anomalias são contrárias às expectativas e às regularidades das leis e teorias científicas. Muitas vezes elas não são levadas a sério e percebê-las se trata de um trabalho complexo, pois são fenômenos para qual o paradigma não preparou o cientista. A novidade emerge somente para aquele que, guiado pelo paradigma, sabia precisamente o que esperar e foi capaz de perceber que algo saiu errado. Quanto mais preciso é o alcance de um paradigma, mais sensível ele será como um indicador de anomalias. Isso só é possível porque a ciência normal é rígida, sua resistência à mudança garante que os cientistas não serão perturbados sem razão e que não abandonarão facilmente seus paradigmas. Se a consciência da anomalia permanecer por tanto tempo, sem sucesso de resolução pelo paradigma hegemônico vigente, ela penetra tão profundamente na comunidade científica que passa a ser possível descrever os campos por ela afetados como em estado de *crise* crescente.

Com base em diversos exemplos que ocorreram na História da Ciência, Kuhn afirma que um sintoma muito usual de uma crise é a proliferação de muitas versões de uma teoria para responder aos problemas anômalos, outro efeito típico da crise é a competição crescente pela explicação por escolas de pensamento diferentes. Ocorreu com a teoria do flogisto na Química, com o éter luminífero de Maxwell na Física, com o modelo geocêntrico na Astronomia, e em diversos outros exemplos. Esses paradigmas fracassaram na resolução das crises que eles mesmos ajudaram a criar. Quando uma teoria atinge o status de paradigma, ela somente será considerada inválida se houver uma alternativa disponível para substituí-la. Na Ciência, ao decidir rejeitar um paradigma,

simultaneamente se está aceitando outro. A incapacidade de tolerar as pressões geradas pelas crises leva muitos a abandonarem a Ciência. Sobre isso Kuhn fala:

*“A emergência de novas teorias é geralmente precedida por um período de insegurança profissional pronunciada, pois exige a destruição em larga escala de paradigmas e grandes alterações nos problemas e técnicas da ciência normal. Como seria de esperar, essa insegurança é gerada pelo fracasso constante dos quebra-cabeças da ciência normal em produzir os resultados esperados. O fracasso das regras existentes é o prelúdio para uma busca de novas regras.” [56]*

O lado positivo das crises é que, ao permitir a proliferação de novas versões do paradigma, elas enfraquecem as regras de resolução dos quebra-cabeças da ciência normal, de tal forma que acaba permitindo com que emerjam novos paradigmas. O lado negativo é que, uma vez que a ciência normal busca solucionar os quebra-cabeças, o fracasso em alcançar uma solução para as anomalias recai primeiro sobre o cientista e não desacredita diretamente a teoria. Vale a analogia do livro *“O carpinteiro que culpa suas ferramentas pelo seu fracasso é visto pelos colegas mau carpinteiro”*. Então, quando uma anomalia se torna algo maior do que um novo quebra-cabeça da ciência normal, se inicia uma transição para a crise e para a *ciência extraordinária*, a anomalia passa a ser reconhecida pela comunidade científica e um número crescente de cientistas passa a dedicar sua atenção a ela. A esta altura, embora ainda exista um paradigma, poucos membros da comunidade estão de acordo sobre qual seria ele e até soluções antes aceitas passam a ser questionadas. Kuhn traz exemplos históricos para demonstrar o quão dramático é um momento de crise:

*“Einstein, limitado pelo emprego corrente de uma linguagem menos rebuscada escreveu apenas que: ‘Foi como se o solo debaixo de nossos pés tivesse sido retirado, sem que nenhum fundamento firme, sobre o qual se pudesse construir, estivesse à vista’. Wolfgang Pauli, nos meses que precederam o artigo de Heisenberg que indicaria o caminho para uma nova teoria dos quanta, escreveu a um amigo: ‘No momento, a física está mais uma vez em terrível confusão. De qualquer modo, para mim é muito difícil. Gostaria de ter-me tornado um comediante de cinema ou algo do gênero e nunca ter ouvido falar de física’. Esse testemunho é particularmente impressionante se contrastado com as palavras que Pauli pronunciou cinco meses depois: ‘O tipo de mecânica proposta por Heisenberg devolveu-me a*

*esperança e a alegria de viver. Sem dúvida alguma, ela não proporciona a solução para a charada, mas acredito que agora é possível avançar novamente’.*” [56]

Como o próprio Kuhn levanta no texto, reconhecimentos explícitos da crise e do fracasso do paradigma são extraordinariamente raros, mas os efeitos de uma crise não dependem da sua consciência e da aceitação de sua existência. Crises transcendem os indivíduos, pois o que elas atacam de fato são os paradigmas. Elas começam com o obscurecimento do paradigma hegemônico e o relaxamento das regras da ciência normal. A ciência em período de crise se assemelha àquela em períodos pré-paradigmáticos. O autor explica três maneiras pelas quais as crises podem terminar: a ciência normal se revelando capaz de solucionar a crise, apesar do desespero daqueles que achavam que seria o fim do paradigma; a crise pode resistir e os cientistas acabam concluindo que não surgirá uma solução para o problema no estado atual da área, ele recebe um rótulo e é posto de lado para que uma geração futura, que disponha de instrumentos e métodos mais avançados, resolva-o; ou o caso mais interessante, quando em meio à crise emerge um novo candidato a paradigma e começa uma batalha pela sua aceitação. A transição de um paradigma em crise a outro não é, de forma alguma, um processo cumulativo, como uma simples articulação do paradigma velho, se trata do surgimento de uma nova tradição científica e uma reconstrução da área de estudo a partir de novos princípios. Uma vez que a transição esteja completa, os cientistas passam a ver o mundo, seu trabalho, seus métodos e seus objetivos de outra forma. As mudanças de paradigmas só são possíveis quando os cientistas percebem o equívoco da tradição antiga perante as anomalias. Algumas palavras do autor, em seu capítulo 7, sobre a resposta à crise valem ser destacadas:

*“Frequentemente, um novo paradigma emerge – ao menos embrionariamente – antes que uma crise esteja bem desenvolvida ou tenha sido explicitamente reconhecida... Creio que é sobretudo nos períodos de crises reconhecidas que os cientistas se voltam para a análise filosófica como um meio para resolver as charadas de sua área de estudos... o novo paradigma, ou uma indicação suficiente para permitir uma posterior articulação, emerge repentinamente, algumas vezes no meio da noite, na mente de um homem profundamente imerso na crise... Quase sempre, os homens que fazem essas invenções fundamentais são muito jovens ou estão há pouco tempo na área de estudos cujo paradigma modificam. Talvez não fosse necessário fazer essa observação, visto que tais*

*homens, sendo pouco comprometidos com as regras tradicionais da ciência normal em razão de sua limitada prática científica anterior, têm grande probabilidades de perceber que tais regras não mais definem alternativas viáveis e de conceber um outro conjunto que possa substituí-las.” [56]*

Agora fica claro porque Kuhn considera revoluções científicas episódios de desenvolvimento científico não cumulativo, o paradigma antigo é total ou parcialmente substituído por um novo, incompatível com o anterior. Revoluções científicas são eventos de mudança de paradigma. Guiados por um novo paradigma, os cientistas mudam sua prática e adotam novos métodos, e as vezes até novos instrumentos, para interpretar seu objeto de estudo. Com isso, seus manuais e veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal devem ser reescritos, parcial ou totalmente. Algo de imensa importância de se destacar é que a cada revolução científica, a linguagem que estrutura e dissemina a ciência deve ser reescrita. Sobre os livros e aspectos históricos das ciências, Kuhn diz:

*“É característica dos manuais científicos conterem apenas um pouco de história, seja um capítulo introdutório, seja, como acontece mais frequentemente, em referências dispersas aos grandes heróis de uma época anterior... Em parte por seleção e em parte por distorção, os cientistas de épocas anteriores são implicitamente representados como se tivessem trabalhado sobre o mesmo conjunto de cânones estáveis que a revolução mais recente em teoria e metodologia científica fez parecer científicos... não é de admirar que, ao ser reescrita, a ciência apareça, mais uma vez, como sendo basicamente cumulativa. Por certo os cientistas não são o único grupo que tende a ver o passado de sua disciplina como um desenvolvimento linear em direção ao ponto de vista privilegiado do presente. A tentação de escrever a história passada a partir do presente é generalizada e perene. Mas os cientistas são mais afetados pela tentação de reescrever a história, em parte porque os resultados da pesquisa científica não revelam nenhuma dependência óbvia com relação ao contexto histórico da pesquisa e em parte porque, exceto durante as crises e revoluções, a posição contemporânea do cientista parece muito segura... Disso resulta uma tendência persistente a fazer com que a história da ciência pareça linear e cumulativa, tendência que chega a afetar mesmo os cientistas que examinam retrospectivamente suas pesquisas... O manual sugere que os cientistas procuram realizar, desde os primeiros empreendimentos científicos, os objetivos particulares presentes nos paradigmas atuais. Num processo frequentemente comparado à adição de*

*tijolos a uma construção, os cientistas juntaram um a um os fatos, conceitos, leis ou teorias ao caudal de informações proporcionado pelo manual científico contemporâneo. Mas não é assim que a ciência se desenvolve. Muitos dos quebra-cabeças da ciência normal contemporânea passaram a existir somente depois da revolução científica mais recente. Poucos deles remontam ao início histórico da disciplina na qual aparecem atualmente. As gerações anteriores ocuparam-se com seus próprios problemas, com seus próprios instrumentos e cânones de resolução. E não foram apenas os problemas que mudaram, mas toda a rede de fatos e teorias que o paradigma dos manuais adapta à natureza.” [56]*

Mudanças de paradigma são eventos onde se observa uma tremenda resistência da comunidade científica. Os paradigmas competidores são incomensuráveis e seus proponentes vivem em mundos diferentes. Muitos cientistas sequer chegam a se converter ao novo paradigma. Kuhn traz vários exemplos, o heliocentrismo fez poucos adeptos durante quase um século após a morte de Copérnico, o *Principia* de Newton demorou mais de meio século para alcançar aceitação geral, Priestley nunca aceitou a teoria do oxigênio de Lavoisier, Lorde Kelvin a teoria eletromagnética e assim por diante. Kuhn traz relatos do reconhecimento dos próprios cientistas das dificuldades enfrentadas:

*“Darwin, numa passagem particularmente perspicaz, escreveu: ‘Embora esteja plenamente convencido da verdade das concepções apresentadas neste volume [...], não espero, de forma alguma, convencer naturalistas experimentados cujas mentes estão ocupadas por uma multidão de fatos, concebidos através de anos, de um ponto de vista diametralmente oposto ao meu [...] (Mas) encaro com confiança o futuro – os naturalistas jovens que estão surgindo, que serão capazes de examinar ambos os lados da questão com imparcialidade’. Max Planck, ao passar em revista a sua carreira no seu *Scientific Autobiography*, observou tristemente que ‘uma nova verdade científica não triunfa convencendo seus oponentes e fazendo com que vejam a luz, mas porque seus oponentes finalmente morrem e uma nova geração cresce familiarizada com ela’.” [56]*

A adesão de uma comunidade científica a um novo paradigma não é um ato forçado, pois é natureza da pesquisa científica da ciência normal ser rígida e é assim que os cientistas são educados e formados, dentro desta tradição rígida debaixo do guarda-chuva do paradigma vigente. É essa rigidez e certeza que torna a ciência normal capaz de

solucionar seus quebra-cabeças. Isso é o que permite a comunidade explorar o alcance e o potencial do velho paradigma, encontrar as anomalias que ocasionarão nas crises à tradição hegemônica, que permitirá a emergência de novos paradigmas e as subsequentes revoluções científicas. Ele explica como se finaliza este processo de mudança de paradigma:

*“Mas para que o paradigma possa triunfar é necessário que ele conquiste alguns adeptos iniciais, que o desenvolverão até o ponto em que argumentos objetivos possam ser produzidos e multiplicados... No início o novo candidato a paradigma poderá ter poucos adeptos e em determinadas ocasiões os motivos destes poderão ser considerados suspeitos. Não obstante, se eles são competentes aperfeiçoarão o paradigma, explorando suas possibilidades e mostrando o que seria pertencer a uma comunidade guiada por ele. Na medida em que esse processo avança, se o paradigma estiver destinado a vencer sua luta, o número e a força de seus argumentos persuasivos aumentará. Muitos cientistas serão convertidos e a exploração do novo paradigma prosseguirá. O número de experiências, instrumentos, artigos e livros baseados no paradigma multiplicar-se-á gradualmente. Mais cientistas, convencidos da fecundidade da nova concepção, adotarão a nova maneira de praticar a ciência normal, até que restem apenas alguns poucos opositores mais velhos. E mesmo estes não podemos dizer que estejam errados. Embora o historiador sempre possa encontrar homens – Priestley, por exemplo – que não foram razoáveis ao resistir por tanto tempo, não encontrará um ponto onde a resistência torna-se ilógica ou acientífica. Quando muito ele poderá querer dizer que o homem que continua a resistir após a conversão de toda a sua profissão deixou ipso facto de ser um cientista.” [56]*

É possível concluir que o progresso na Ciência ocorre através das revoluções científicas e que toda Ciência, seja ela natural ou humana, as experimenta. Esse processo ocorre por meio da competição entre escolas de pensamento e do questionamento dos fundamentos da área. Princípios fundamentais de uma disciplina são repensados durante os períodos revolucionários. O desenvolvimento científico se dá a partir de um início primitivo, cujos estágios sucessivos se caracterizam por uma compreensão mais refinada e detalhada da natureza, mas não é um processo evolutivo orientado para algum objetivo específico. Kuhn argumenta que a evolução das ideias científicas ocorre de forma análoga à ideia de Darwin da evolução das espécies por seleção natural, porque os paradigmas competem pela sua sobrevivência dentro da comunidade científica e, com o passar do



tempo e das revoluções, o saber se torna cada vez mais especializado. Não existe uma “verdade científica” eterna e fixa, o estágio presente do desenvolvimento científico não é o fim, perfeito e completamente aprimorado, e nunca será. Outras revoluções estão por vir.

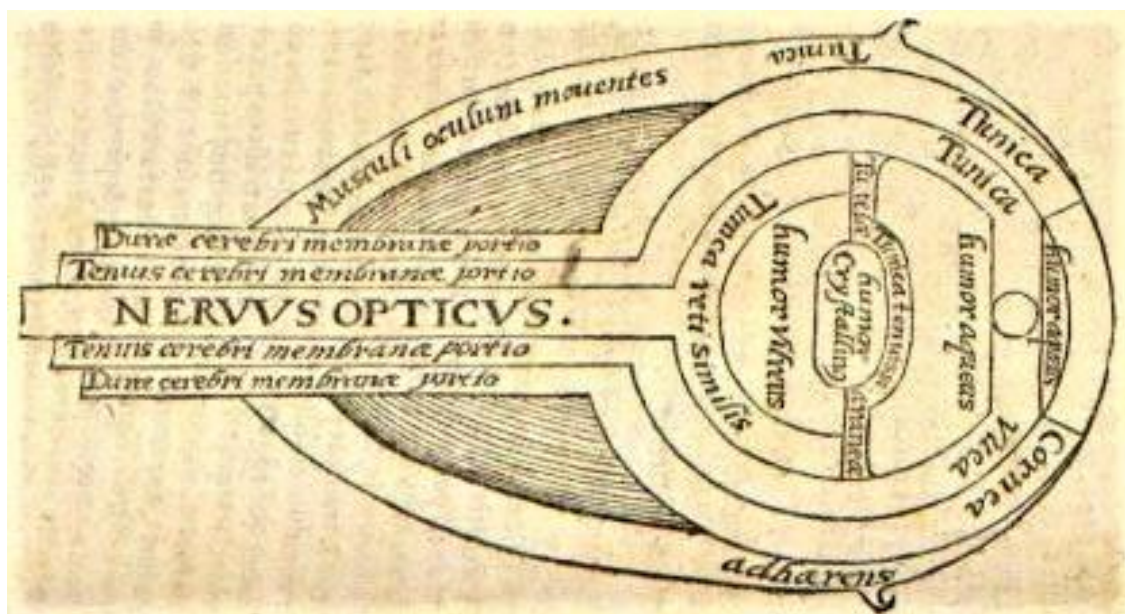
#### 4.2. Da História da luz aos fundamentos da Fotoquímica

A luz é crucial para a Vida na Terra, ela fornece a energia necessária para que organismos fotossintetizantes, como cianobactérias, algas e plantas, sejam capazes de converter dióxido de carbono e água em açúcares e oxigênio molecular, ela permite ainda com que muitos animais obtenham informações do ambiente através da visão. O Sol, a estrela no centro do nosso sistema solar, é a grande fonte de luz deste planeta e sua energia é a base para a maior parte da biosfera. A luz fascina a humanidade desde os primórdios. É desde muito antes da Ciência que os seres humanos já reconhecem a importância desta estrela, visto que ao longo da História ela foi cultuada e endeusada como uma entidade superior por diversos povos, por exemplo: para os gregos antigos, Hélios era o deus e a personificação do Sol; para os japoneses, Amaterasu era a deusa solar; para os povos tupis-guaranis, Guaraci era o deus Sol e para os egípcios o deus solar era Rá [106,107,108,109].

A natureza da luz intriga os cientistas há séculos. Os raios luminosos possuem diversas características importantes: eles podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos pela matéria, podem ter seu percurso desviado ao passar de um meio para outro (refração), ou ainda contornar obstáculos (difração). O ramo da Ciência que se encarrega de estudar fundamentalmente a luz, suas trajetórias e suas aplicações é a Óptica, uma das grandes áreas da Física. O cientista islâmico Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham (965-1039), mais conhecido pelo seu nome na sua forma latinizada “Alhazen”, é considerado o pai da Óptica, devido às suas imensas contribuições e influência nos primórdios da área [110]. Alhazen foi um dos primeiros cientistas experimentais da História e desenvolveu um método pioneiro de trabalho de pesquisa científica, mil anos antes de René Descartes e Francis Bacon, que muito se assemelha ao método científico moderno [111].

Ele passou 10 anos sob prisão domiciliar e, durante este período confinado, estudou intensamente a luz, investigou a formação de sombras, as cores do pôr do Sol, os arco-íris, eclipses e a visão. A partir de suas investigações empíricas, Alhazen escreveu e publicou sete pergaminhos, intitulados *Kitab al-Manazir*, que foram traduzidos para o

Latim em 1270 como *Opticae Thesaurus: Alhazeni Arabis*, mais conhecido pelo nome mais simples: *Livro de Óptica*. Suas investigações em seu *Livro de Óptica* foram de grande influência para muitos filósofos e cientistas europeus séculos mais tarde, como o astrônomo Johannes Kepler, o filósofo Francis Bacon, dentre outros. Ele fez experimentos com espelhos e lentes, mostrou que a luz viaja em linhas retas, provavelmente a partir da inferência de que objetos sólidos são capazes de projetar sombras nítidas, e provou isso usando uma *camera obscura*. Um dentre os diversos tópicos que ele cobriu em seu trabalho foi a forma como enxergamos. Aristóteles e outros, como Euclides e Ptolomeu, haviam dito que enxergamos porque, quando olhamos para algo, raios saem de nossos olhos e batem no objeto. Alhazen percebeu que isso estava errado, pois a luz existe independentemente de estarmos ou não olhando. Como durante o dia tudo está iluminado pelo Sol, a luz estaria, na verdade, ricocheteando em objetos e indo em diversas direções, inclusive na direção de nossos olhos, já durante a noite não existe a luz solar, mas esta iluminaria a Lua e seria refletida por ela em nossa direção, nos permitindo enxergar este satélite. Alhazen entendeu que o que precisamos fazer é apenas abrir os olhos para deixar a luz entrar, desta forma a visão não seria um fenômeno ativo como imaginado pelos gregos antigos, mas sim um fenômeno passivo, pelo menos até ela chegar na retina. Ele realizou experimentos com olhos de boi, mostrando que a luz entrava por um pequeno orifício na frente, a pupila, e era focada por uma lente em uma superfície sensível no fundo do olho, a retina. Em seu *Livro de Óptica* ele mostra um diagrama, que pode ser visto na Figura 3, bastante preciso da anatomia do olho humano, com estruturas como a córnea, humor aquoso, humor vítreo e nervo óptico, tal como são chamados ainda hoje [110].



**Figura 3.** Diagrama do olho humano do *Livro de Óptica* de Alhazen [110].

O filósofo, matemático e cientista francês René Descartes (1596-1650) também tratou sobre a natureza da luz quando publicou, em 1637, seu livro *Discours de la méthode* (Discurso do método), acompanhado de três ensaios *La dioptrique*, *Les météores* e *La géométrie* (A dióptrica, Os meteoros e A geometria) [112]. Em *A dióptrica*, Descartes aborda diversas questões ligadas à óptica, trata sobre a natureza da luz, suas propriedades de reflexão e refração, de questões anatômicas e fisiológicas ligadas à visão, sobre a sensação visual e a função cognitiva da visão e, por fim, sobre questões técnicas de instrumentos ópticos, como a produção de vidros e lentes para telescópios e microscópios, bem como seus potenciais para corrigir e aperfeiçoar a visão e avançar na instrumentação científica. Descartes absorveu, em seu ensaio sobre a luz, toda a óptica do astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), mas se aprofundou nos estudos fisiológicos do olho e da visão, propôs um mecanismo pelo qual as imagens projetadas na retina chegariam ao cérebro e, ao contrário de Kepler, ele tratou sobre as dificuldades técnicas ligadas à produção de lentes [113,114].

Descartes usa analogias em seu ensaio, e compara o comportamento da luz ao de corpos rígidos, a fim de facilitar a compreensão da natureza luminosa, explicar suas propriedades e demonstrar as leis da reflexão e da refração através de um raciocínio físico-geométrico. Uma de suas analogias é a do “bastão do cego”, onde ele supõe que a luz se propaga instantaneamente e que a sua unidade fundamental, o raio de luz, se comportaria tal como a matéria. Para ele, o raio de luz se tratava de um corpo inelástico

e retilíneo, e qualquer ação em uma extremidade do raio seria transmitida mecanicamente para a outra extremidade instantaneamente. Essa forma de pensar sobre a luz vem desde Aristóteles, que também defendia a ideia da velocidade de propagação instantânea da luz [114]. A seguir se encontra destacada uma passagem do ensaio *A dióptrica* onde se observa a analogia do bastão do cego.

*“Sem dúvida, algumas vezes ocorreu-vos, ao caminhar à noite sem tocha por lugares um pouco difíceis, que seria necessário o auxílio de um bastão para conduzir-vos, e teríeis então podido constatar que sentis, pela extremidade do bastão, os diversos objetos que se encontravam no vosso entorno, e até mesmo que vós poderíeis distinguir se havia árvores, pedras, areia, água, grama, lama ou qualquer coisa parecida. É verdade que esse tipo de sensação é um pouco confuso e obscuro naqueles que não fazem um demorado uso do bastão, mas, considerando aqui aqueles que, tendo nascido cegos, serviram-se do bastão por toda sua vida, neles encontrareis uma sensação tão perfeita e tão exata que se poderá quase dizer que eles veem pelas mãos, ou que seu bastão é o órgão de algum sexto sentido que lhes foi dado na falta da visão. E, fazendo disso uma comparação, desejo que vós penseis que a luz, nos corpos que denominamos luminosos, não é outra coisa que certo movimento, ou ação muito rápida e muito viva, que passa para nossos olhos por intermédio do ar e de outros corpos transparentes, da mesma maneira que o movimento ou a resistência dos corpos, que esse cego encontra, passa para sua mão por intermédio do bastão. Isso vos impedirá, inicialmente, de achar estranho que essa luz possa estender seus raios em um instante, desde o Sol até nós, pois sabeis que a ação, pela qual movemos uma das extremidades de um bastão, deve passar assim em um instante até a outra extremidade, e que ela deveria passar do mesmo modo, ainda que houvesse mais distância do que aquela entre a Terra e os céus. Tampouco acharíeis estranho que por seu meio possamos ver todos os tipos de cores, e até acreditaríeis talvez que essas cores não são outra coisa, nos corpos que nomeamos coloridos, senão os diversos modos pelos quais esses corpos recebem e enviam a ação da luz em direção de nossos olhos, se considerardes que as diferenças que um cego nota entre as árvores, as pedras, a água e coisas semelhantes, por intermédio de seu bastão, não lhe parecem menores do que nos provocam aquelas que estão entre o vermelho, o amarelo, o verde e todas as outras cores, e que, todavia, essas diferenças não são outra coisa, em todos esses corpos, senão as diversas maneiras de mover ou de resistir aos movimentos desse bastão.” [114]*

Descartes conclui a partir disso que não é necessário que algo seja transferido dos objetos iluminados até os olhos para que se veja as cores, nem que exista algo intrínseco do objeto semelhante às sensações que se obtém deles através dos sentidos, assim como nada sai do objeto pelo bastão até a mão do cego. Para ele, a única causa das sensações advém da resistência ou do movimento dos corpos. A ação da luz é concebida como uma ação instantânea, retilínea e mecânica, ela não transporta matéria ou algum corpúsculo luminoso, mas sim seria uma resistência ou tendência de movimento do corpo. Descartes também faz uma analogia do raio de luz com bolas que sofrem deflexões mecânicas ao colidirem com uma superfície para explicar fenômenos ligados à reflexão e à refração. Mariconda e Neto, que traduziram o texto e fizeram notas, ressaltam que Descartes não desenvolve ou considera na dióptrica uma teoria das cores, como ele mesmo afirma “isso ultrapassa os limites do meu assunto”, se referindo às cores. Os tradutores explicam que o autor só viria a desenvolver sua teoria das cores em *Os meteoros*, na parte dedicada ao estudo dos arco-íris [114].

Uma das muitas mentes influenciadas por René Descartes foi a do físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727), um dos maiores gênios da humanidade nas Ciências Naturais. Ele é o autor do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural, 1687, um dos trabalhos mais importantes da Ciência), criou o Cálculo, descreveu a gravidade, deu enormes passos na Mecânica, avançou na Astronomia e, também, na Óptica. Newton foi aluno da Universidade de Cambridge, quando ele se matriculou, em 1661, o período histórico hoje conhecido como a *Revolução Científica* já estava em curso e trabalhos como os de Copérnico, Kepler e Galileu estavam, apesar de muita resistência, começando a influenciar a comunidade científica. Filósofos e cientistas, liderados pelo pensamento cartesiano, estavam repensando o mundo natural, tal como era entendido pelos aristotélicos, e formulando novas formas de se conceber a Natureza, apesar do aristotelismo e do geocentrismo ainda terem muita força na sociedade e na universidade, muito por influência da Igreja. Na graduação, assim como todos os outros estudantes de ensino superior da época, ele também começou seus estudos universitários nos trabalhos aristotélicos e apesar da nova filosofia não compor formalmente seu currículo, ela pairava pela sociedade. Descartes e outros filósofos e cientistas, que viam o mundo de forma diferente de Aristóteles, foram muito responsáveis por influenciar o pensamento de Newton [115]. Em 1665, durante uma epidemia de Peste Negra (evento hoje conhecido como Grande Praga de Londres, que matou 1/5 da população de Londres na época), Newton ficou de quarentena em casa

pois a universidade estava fechada. Enclausurado por 18 meses, ele produziu alguns de seus melhores trabalhos em Física e Matemática: ele solucionou diversos problemas matemáticos, inventou o Cálculo, investigou a formação de cores do arco-íris a partir da luz solar e teve seus primeiros *insights* sobre a gravidade, e, por isso, este ano ficou conhecido como seu *annus mirabilis* [110]. Ele começou seus experimentos com a luz e a óptica por volta de 1666 e foi o primeiro cientista na História a observar, documentar e publicar seus resultados sobre os componentes da luz branca. Em 1667 ele voltou para Cambridge e passou a dar aulas de óptica e foi eleito, em 1669, “*Lucasian Professor of Mathematics*” [110]. Em 1672, ele publicou seu primeiro artigo científico, sobre a luz e as cores do arco-íris, na revista *Philosophical Transactions* da Royal Society [116]. Neste artigo, Isaac Newton explica que em 1666 ele se fechou dentro de uma câmara escura, com apenas um pequeno buraco na janela que permitia entrar um feixe de luz, como ele diz no artigo “uma quantidade conveniente de luz solar”, e um prisma na direção dos raios luminosos, que transformava a luz solar em um arco-íris de cores para a surpresa dele. Conforme o próprio diz no começo do artigo:

“SIR,

*To perform my late promise to you, I shall without further ceremony acquaint you, that in the beginning of the Year 1666 (at which I applied myself to the grinding of Optick glasses of other figures than Spherical,) I procured me a Triangular glass-Prisme, to try therewith the celebrated Phenomena of Colours. And in order thereto having darkened my chamber, and made a small hole in my window-shuts, to let in a convenient quantity of the Suns light, I placed my Prisme at his entrance, that it might be thereby refracted to the opposite wall. It was at first a very pleasing divertissement, to view the vivid and intense colours produced thereby; but after a while applying myself to consider them circumspectly, I became surprised to see them in an oblong form; which, according to the received laws of Refraction, I expected should have been circular.*

*They were terminated at the sides with streight lines, but at the ends, the decay of light was so gradual, that it was difficult to determine justly, what was their figure; yet they seemed semicircular.*

*Comparing the length of this coloured Spectrum with its breadth, I found it about five times greater; a disproportion so extravagant, that it excited me more then ordinary curiosity of examining, from whence it might proceed.”*

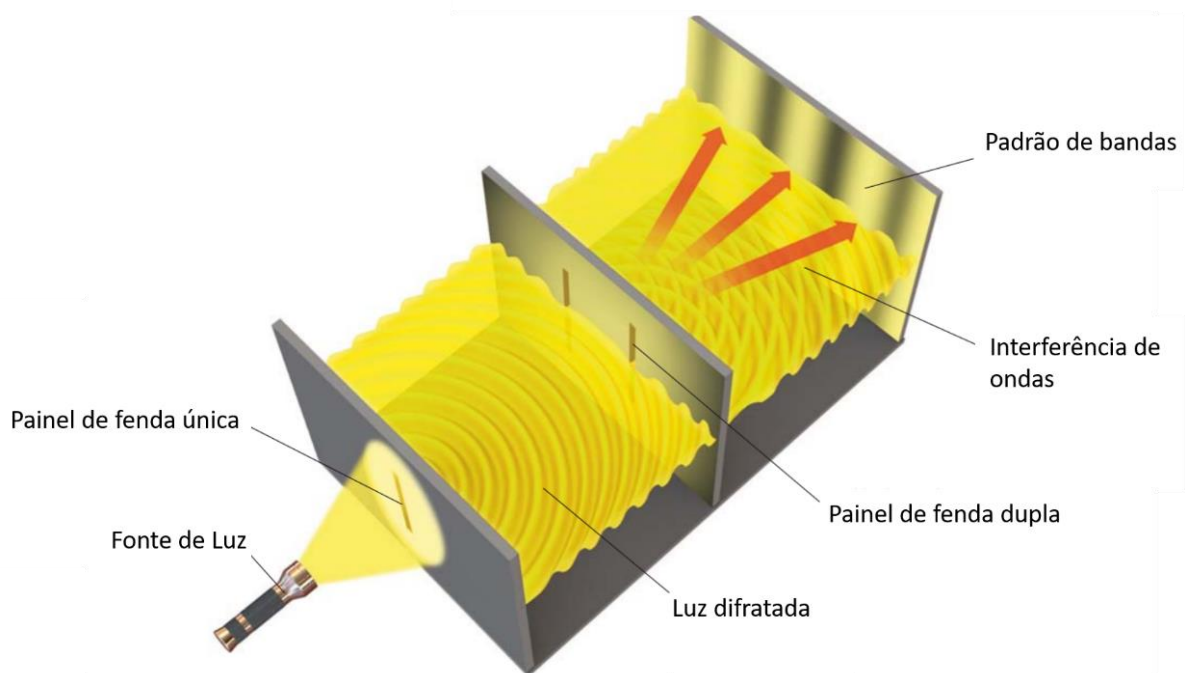
(Com pequenas adaptações de letras arcaicas do século XVII para as letras do alfabeto atual) [116]

Newton mostrou que a cor é algo intrínseco à luz, que a luz branca se trata, na verdade, da mistura de muitas cores, que podem ser separadas e reunidas utilizando prismas. “*Colours are not Qualifications of Light, derived from Refractions, or Reflections of natural Bodies (as its generally believed,) but Original and connate properties...*” [116]. Ele também concluiu que as cores de objetos não são características inatas deles, na realidade o objeto colorido reflete mais uma luz de uma cor do que outra: “*I might add more instances of this nature, but I shall consider with this general one, that the Colours of all natural Bodies have no other origin than this, that they are variously qualified to reflect one sort of light in greater plenty than another.*” [116]. Outro fato, bastante curioso, é que foi Newton, neste artigo de 1672, que cunhou o uso científico da palavra “Spectrum” no sentido físico que se conhece e usa hoje, antes dele ninguém havia usado esta palavra desta forma. A palavra espectro, que antes era somente associada a fantasmas, passou a ter também o sentido de uma banda contínua de cores. Do Latim, *spectrum* significa “aparição” ou “imagem” e vem de *specere* que significa “olhar” [117].

Suas pesquisas sobre o fenômeno de reflexão da luz, em particular o fato de que raios luminosos se movem em linhas retas e projetam sombras nítidas, o levaram a concluir que a luz era composta de um grande fluxo de “corpúsculos”, ou seja, de partículas. Algumas de suas conclusões, publicadas em seu artigo de 1672, foram criticadas pelo cientista inglês Robert Hooke (1635-1703). Newton recebeu as críticas como um ataque pessoal e jurou nunca mais publicar nada de óptica enquanto Hooke vivesse. Em 1703 Newton foi eleito presidente da Royal Society e, após a morte de seu rival da óptica, ele publicou, em 1704, seu livro *Opticks*, nesta época ele já possuía uma excelente reputação e suas ideias foram rapidamente aceitas. Ele presidiu a Royal Society com punho de ferro por 24 anos, durante este período o único retrato conhecido de Hooke desapareceu misteriosamente [110].

No final dos anos 1670, o físico, astrônomo e matemático holandês Christiaan Huygens (1629-1695) defendia uma alternativa para a teoria corpuscular da luz, ele e outros cientistas, como Hooke, acreditavam que a natureza da luz era ondulatória. A evidência inicial era a capacidade de raios de luz se cruzarem sem ser afetados, segundo ele, as partículas iriam inevitavelmente colidir umas com as outras e ter suas trajetórias desviadas em direções diferentes. Huygens publicou seu trabalho “*Traité de la lumière*” (Tratado sobre a luz) em 1690, onde discute a natureza e propriedades da luz, defendendo a ideia de que ela se comporta como onda e que dessa forma seria possível explicar os

fenômenos de refração e reflexão conhecidos. O debate entre as teorias corpuscular e ondulatória perduraram por décadas. A teoria corpuscular de Newton se manteve majoritariamente aceita durante o século XVIII. Uma evidência muito forte surgiu e encerrou a discussão em 1800, quando o físico britânico Thomas Young (1773-1829) mostrou que a luz difratava ao passar por uma fenda dupla, formando um padrão de bandas claras e escuras em um anteparo. Um esquema deste experimento pode ser observado na Figura 4. O padrão de luz formado neste experimento da dupla fenda de Young foi interpretado como mais uma evidência da natureza ondulatória da luz, pois as ondas são capazes de interferir construtiva e destrutivamente umas com as outras, formando as franjas observadas. Caso a luz fosse composta por partículas, o padrão esperado deveria ser de apenas duas bandas claras na direção das fendas. A difração derrubou a teoria corpuscular da luz de Newton [110].



**Figura 4.** Experimento da dupla fenda. Adaptado de Science: The definitive visual guide (2016) [110].

Antes de 1800 não se suspeitava que houvesse outras formas de luz invisíveis aos olhos humanos. A primeira descoberta de radiações semelhantes à luz, mas invisíveis, foi um resultado inesperado de um experimento realizado pelo astrônomo alemão, naturalizado inglês, William Herschel (1738-1822). Em fevereiro de 1800, Herschel estava testando diversos filtros para observar manchas na superfície do Sol, ele observou



que filtros coloridos diferentes aqueciam de maneira desigual, com isso ele começou a suspeitar que as diferentes cores da luz teriam temperaturas diferentes associadas a elas. Em seu experimento, ele usava um prisma para separar a luz solar em suas cores componentes e media, com termômetros, a temperatura de regiões diferentes de dentro e fora do espectro. Ele percebeu que ao avançar do violeta em direção ao vermelho a temperatura aumentava e decidiu medir a região aparentemente vazia após o vermelho, onde essa cor desaparecia na invisibilidade, e para a sua surpresa essa região se revelou a mais quente de todas. Após realizar mais experimentos, ele foi levado a concluir que deveria existir alguma forma de “luz invisível”, que o Sol era capaz de emitir, e nomeou esta nova forma de luz de “raios caloríficos” [110]. Essa forma de radiação foi posteriormente renomeada como radiação infravermelha. Em homenagem a este astrônomo, a *European Space Agency* (Agência Espacial Europeia) lançou em 14 de maio de 2009 um poderoso telescópio, na época o maior telescópio de infravermelho, o Observatório Espacial Herschel, que tinha por objetivo estudar, nesta faixa do espectro, a origem e a evolução de estrelas e galáxias, auxiliando na compreensão da formação do Universo [118].

A descoberta do Herschel inspirou o químico alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), que descobriu outro tipo de radiação invisível, além da extremidade do violeta no espectro. Em 1801, Ritter investigou como a luz de diferentes cores afetava uma reação química de escurecimento de sais de prata e descobriu que a região azul do espectro escurecia os sais mais rapidamente do que a região vermelha. Ao testar esta reação de escurecimento do sal de prata na região além do violeta ele percebeu que ela ocorria mais rapidamente, o levando a concluir que assim como os “raios caloríficos” existiam após o vermelho, existia uma forma de luz capaz de provocar algumas reações químicas além do violeta. Esta nova forma de radiação foi batizada de “raios químicos”, mas posteriormente recebeu o nome que se usa até hoje: radiação ultravioleta [110,119].

Apesar de intrigantes, estas novas formas conhecidas de radiação teriam de esperar ainda algumas décadas para serem compreendidas, pois os paradigmas ópticos da época não tinham muito a dizer sobre novas formas de luz invisíveis aos seres humanos. A solução para esse problema da Óptica viria de outros ramos da Física, a Eletricidade e o Magnetismo, mais especificamente da área combinada, o Eletromagnetismo. Muitos cientistas, como Ørsted, Ampère, Gauss e Faraday, já vinham trabalhando com questões experimentais dos fenômenos elétricos e magnéticos, mas foi o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) quem unificou as duas teorias, destilando todo

o conhecimento que se tinha acerca desses fenômenos em 20 equações diferenciais com 20 variáveis, posteriormente reformuladas pelo matemático e físico inglês Oliver Heaviside (1850-1925) em apenas 4 equações (conhecidas hoje como *equações de Maxwell*), forjando assim o Eletromagnetismo Clássico. Essas equações se mostraram muito poderosas e unificadoras na Física, sendo capazes não só de descrever as propriedades de fenômenos associados a campos elétricos e magnéticos, que na verdade são duas faces de uma entidade física única, o campo eletromagnético, mas também se mostraram capazes de descrever a natureza da luz [110]. Suas equações previam a existência de ondas de campos elétricos e magnéticos ortogonais e oscilantes, capazes de se propagar no vácuo. Maxwell calculou, com os dados disponíveis a ele, a velocidade dessas ondas e o resultado obtido foi 310.740.000 m/s, valor muito próximo ao medido experimentalmente para a velocidade da luz na época. Em 1864, Maxwell escreveu em seu artigo “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*”, publicado em 1865, duas coisas particularmente interessantes acerca da natureza da luz:

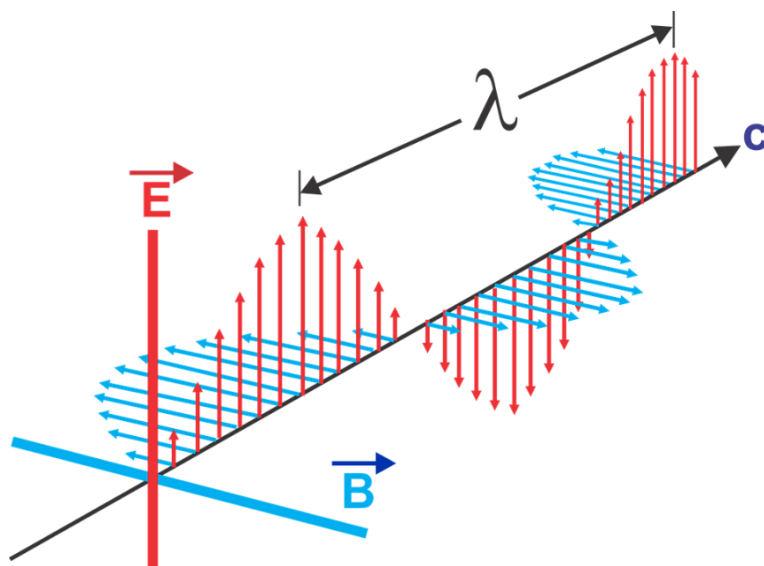
*“This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.”* [120]

*“The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws.”*

[120]

De acordo com o Eletromagnetismo Clássico, é possível descrever física e matematicamente a luz como ondas eletromagnéticas, oscilações que se propagam no campo eletromagnético e que obedecem às equações de Maxwell. Somente no final do século XIX foi possível definir luz como qualquer perturbação no campo eletromagnético que se propaga na forma de onda. O próprio Maxwell deixa em aberto (*and other radiations if any*) a possibilidade de existirem outras ondas eletromagnéticas, além das até então experimentalmente observadas. Uma forma de se visualizar estas ondas pode ser vista no diagrama da Figura 5. O campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e o campo magnético ( $\vec{B}$ ) são ortogonais e oscilantes, a direção de propagação da onda transversal é ortogonal a ambos os campos, a velocidade da onda é uma constante  $c$  (hoje se sabe que o valor de  $c$  é equivalente a 299.792.458 m/s no vácuo) e o comprimento de onda, “ $\lambda$ ” (lambda), é uma

variável que corresponde à distância entre dois picos ou dois vales da onda (ou quaisquer dois pontos equivalentes da onda). Assim, as ondas eletromagnéticas de  $\lambda$  diferentes configuram tipos diferentes de luz, isso explica as diferentes cores do espectro. Uma grandeza também associada às ondas é a frequência, “ $\nu$ ” (ni), que corresponde à quantidade de vezes por segundo em que o seu deslocamento em um ponto fixo retorna ao seu valor original. As variáveis  $\lambda$  e  $\nu$  são inversamente proporcionais e se relacionam através da equação:  $c = \lambda \cdot \nu$ .



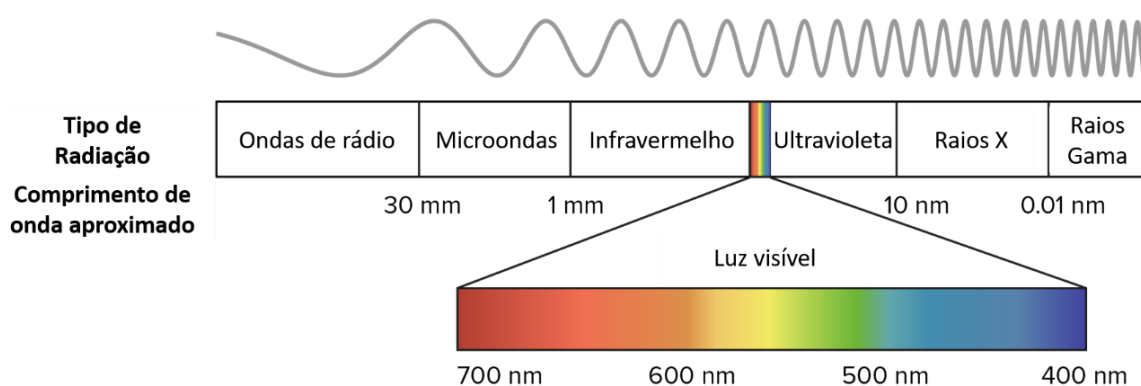
**Figura 5.** Diagrama com a representação de uma onda eletromagnética. Fonte: G1 (2018). [121]

Com seu trabalho, Maxwell abriu portas para a expansão das ondas eletromagnéticas para além das três formas de radiação até então conhecidas pela comunidade científica: visível, infravermelho e ultravioleta. Novas formas de luz estavam por ser descobertas e o *espectro eletromagnético* viria a crescer. Em 1887, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) observou em laboratório novas ondas eletromagnéticas, antes chamadas de “Hertzian waves” mas hoje conhecidas como ondas de rádio, dando mais força à teoria eletromagnética da luz [122,123,124]. Em sua homenagem, por ter demonstrado a existência das ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell, a unidade de frequência (ciclos por segundo) foi nomeada “hertz” (Hz) [125]. Muitos cientistas e engenheiros de diversas nacionalidades estudaram as “ondas Hertzianas”, desde a sua geração às suas aplicações, neste processo alguns acabaram criando em laboratório ondas de comprimento consideravelmente menores do que aquelas com que Hertz trabalhou: as micro-ondas, ondas eletromagnéticas com  $\lambda$  menores e com

frequências maiores do que as ondas de rádio. Um deles foi o físico italiano Augusto Righi (1850-1920), que criou, em 1893, ondas de alguns poucos centímetros de comprimento, abrindo assim o campo de pesquisas em micro-ondas, ondas eletromagnéticas com  $\lambda$  menores e com frequências maiores do que as ondas de rádio [126,127]. Além das diversas aplicações tecnológicas que esta faixa de radiação eletromagnética proporcionou à humanidade, ela configura uma das mais fortes evidências do modelo *Big Bang* sobre a origem do Universo, devido à detecção da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (*Cosmic microwave background radiation*), um “fóssil luminoso” remanescente dos primórdios do Universo [128,129]. Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) descobriu outro tipo de radiação eletromagnética, por ele próprio nomeado como “X-Strahlen” (raios-X). Na ocasião de sua descoberta não se sabia que eram da mesma natureza da luz, por este motivo ele usou a letra “X”, devido à tradição de usá-la como incógnita em equações matemáticas. Röntgen publicou sua descoberta, em 1895, em seu artigo “*Über eine neue Art von Strahlen*” (Sobre um novo tipo de raios). Pela descoberta dos raios-X, em 1901, Röntgen recebeu o primeiro Prêmio Nobel de Física e em 2004 a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) nomeou o elemento de número atômico 111 de Roentgenium, Rg, em homenagem ao físico [130,131,132,133]. Em 1900, o químico e físico francês Paul Ulrich Villard (1860-1934), enquanto trabalhava com os elementos Urânio e Rádio e as radiações que suas substâncias emitem, descobriu outro tipo de radiação eletromagnética, que eram ondas eletromagnéticas com  $\lambda$  menor do que os raios-X. Villard era um homem modesto e não sugeriu nenhum nome para a radiação que havia descoberto. Experimentos de transmissão com as radiações emitidas por substâncias radioativas já mostravam que elas eram heterogêneas, o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), ganhador do Prêmio Nobel de Química de 1908, já havia nomeado duas radiações distintas, a alfa e a beta, com base em seu poder de penetração. Em janeiro de 1903, Rutherford descreveu essa terceira forma de emissão radioativa, descoberta pelo Villard, como “*rays nondeviable in character, but of great penetrating power*” na *Philosophical Magazine*, e já na edição de fevereiro da revista o trio  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  já havia sido adotado para denotar as três formas de emissão radioativas conhecidas, provavelmente devido à influência de Rutherford. Assim, as ondas eletromagnéticas descobertas por Villard receberam o nome de “raios gama”, sendo imediatamente adotado pela comunidade científica, como fica evidenciado no fato de que a própria física e química Marie Curie fez uso dessa notação em sua tese de doutorado, afirmando que “é

possível distinguir entre três tipos de radiação, que eu vou denotar pelas letras  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , seguindo a notação de Rutherford.” [134].

Finalmente o espectro eletromagnético, tal como se conhece até os dias atuais, havia tomado sua forma completa, das ondas eletromagnéticas de maiores comprimentos de onda às menores: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, visível, ultravioleta, raios-X e raios gama. O espectro eletromagnético pode ser observado na Figura 6. Todas essas radiações compartilham as mesmas características que a luz visível, se propagam como ondas no campo eletromagnético e sofrem fenômenos característicos de difração e refração.



**Figura 6.** Espectro Eletromagnético. Adaptada de: Khan Academy (2020). [135]

No começo do século XIX, alguns cientistas acreditavam que a estrutura teórica da Física estaria próxima de completa, mas alguns resultados experimentais obtidos no final deste mesmo século confrontaram essa crença. A Mecânica Clássica de Newton e o Eletromagnetismo Clássico de Maxwell estavam se mostrando incapazes de descrever adequadamente o que acontecia na escala atômica ou em regimes de velocidades próximas às da luz. Um exemplo é o fato de os paradigmas vigentes estarem falhando em explicar corretamente a distribuição de frequências de ondas eletromagnéticas emitidas por corpos aquecidos. Sabia-se desde a Antiguidade que sólidos, como metais, emitem luz visível quando são aquecidos a altas temperaturas. Um modelo para entender esse fenômeno é idealizando um objeto chamado *corpo negro*, que é capaz de absorver completamente qualquer porção de radiação eletromagnética que é incidida sobre ele, isso também torna este corpo um perfeito emissor de ondas eletromagnéticas, pois qualquer radiação que saia dele não será proveniente de reflexão, apenas de emissão. A uma determinada temperatura, o corpo emite em uma determinada região do espectro

eletromagnético, com um máximo de emissão em uma certa frequência, isso varia conforme a temperatura. Os físicos já haviam medido a distribuição de intensidade de ondas eletromagnéticas emitidas por sólidos aquecidos, mas quando tentaram aplicar mecânica estatística e a teoria eletromagnética da luz para prever a curva de intensidade versus frequência emitida por corpos a diferentes temperaturas, eles encontraram um resultado teórico que discordava completamente não só dos resultados experimentais, mas da realidade, especialmente nas porções de alta frequência do espectro eletromagnético. Isso ficou conhecido na Física como *catástrofe do ultravioleta* [110,136,137].

Em 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1947) desenvolveu uma teoria que trouxe resultados de acordo com aqueles observados experimentalmente nas curvas de emissão de radiação de corpo negro. Ele solucionou o problema da catástrofe do ultravioleta ao assumir que a energia emitida pelo corpo negro, que se originava em vibrações dentro do próprio objeto, era quantizada, ou seja, somente em alguns valores de energia eram permitidos de serem emitidos, de forma *discreta* e descontínua. Assim, a radiação eletromagnética seria emitida quando um átomo sofresse uma mudança em seu modo de oscilação e isso também explicaria a variação na intensidade para diferentes comprimentos de onda. Em outras palavras, Planck introduziu a *quantização de energia* na Física. Em sua homenagem, a constante  $h = 6,626069 \times 10^{-34}$  J.s foi batizada como *constante de Planck* [110,136,138]. Apesar da solução dos *quanta* de Planck para a catástrofe do ultravioleta ser matematicamente elegante, ninguém, nem mesmo ele, acreditava que ela teria algum significado físico mais profundo. Foi somente 5 anos mais tarde, em 1905, que o jovem físico alemão Albert Einstein (1879-1955) deu o próximo passo nessa revolução científica. Atraído pelas implicações da teoria dos quanta do seu conterrâneo, Einstein resolveu outro problema da época, o *efeito fotoelétrico*. Neste caso, o mistério estava em entender por que ao se incidir luzes de diferentes comprimentos de onda sobre uma superfície metálica se obtinha resultados diferentes na ejeção de elétrons do metal. De acordo com a teoria eletromagnética clássica a luz é uma onda eletromagnética e os físicos sabiam que, classicamente, a energia de ondas é proporcional à sua intensidade (e não a outras variáveis, como frequência). Concebendo-se a luz como onda, era esperado que a energia cinética dos elétrons ejetados aumentasse ao aumentar a intensidade da fonte luminosa, e não deveria ocorrer mudanças ao mudar a frequência luminosa. Mas o efeito fotoelétrico trazia resultados totalmente contraintuitivos: a energia cinética dos elétrons independe da intensidade da luz e aumenta proporcionalmente ao

aumento da frequência da luz. Einstein demonstrou, em 1905, que essas observações estavam de acordo com a teoria de Planck e que a luz poderia ser concebida como um conjunto de *quanta de luz*, composta por partículas individuais, cada uma um *quantum* de oscilação eletromagnética (que mais tarde viriam a ser chamadas de *fótons*). Cada fóton possui sua energia descrita pela equação  $E = h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da luz. O efeito fotoelétrico pode ser explicado como o elétron absorvendo um fóton de energia adequada, parte dessa energia seria usada para vencer as forças que o prendem ao metal e o restante se manifesta como a energia cinética do elétron ejetado. Pela conservação de energia, a equação que descreve este fenômeno é  $h\nu = \Phi + 1/2mv^2$ , onde  $\Phi$  é a energia mínima necessária de ser fornecida para o elétron poder escapar do metal e  $1/2mv^2$  é a energia cinética máxima do elétron emitido [110,136].

O efeito fotoelétrico deu evidências aos cientistas de que a luz também pode exibir comportamento corpuscular, além do comportamento ondulatório já conhecido, revivendo o embate antigo sobre a natureza da luz. A Mecânica Quântica, desde o seu surgimento, provocou diversas mudanças na forma de se conceber a natureza da luz e da matéria. Diversos cientistas, além de Planck e Einstein, contribuíram vastamente para o desenvolvimento da Quântica, grandes nomes como Bohr, De Broglie, Pauli, Heisenberg, Schrödinger e Dirac, para citar alguns. Os físicos agora sabiam que os níveis de energia acessíveis no “universo do muito pequeno” são descontínuos, apenas alguns *estados* são permitidos de serem ocupados. Não só a luz apresenta comportamento corpuscular, mas as partículas também apresentam comportamento ondulatório, isso ficou conhecido como a *dualidade onda-partícula*. É impossível determinar simultaneamente e com 100% de precisão o momento e a posição de partículas no mundo quântico, essa limitação ficou conhecida com o *princípio da incerteza de Heisenberg*. Os *estados* nos sistemas quântico-mecânicos podem ser calculados e entendidos através da *função de onda*, simbolizada pela letra grega  $\Psi$  (psi). A função de onda contém todas as informações possíveis sobre um sistema, por isso não é necessário dizer “o estado descrito por  $\Psi$ ”, pois é possível dizer simplesmente “o estado  $\Psi$ ”. A equação de Schrödinger dependente do tempo (eq. 2) representa um dos grandes pilares da Mecânica Quântica [136,137].

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi \quad (2)$$

A partir dela é possível derivar uma versão independente do tempo (eq. 3), um pouco mais simples, mas com aplicações muito úteis na solução de diversos problemas ligados à Física e à Química [136].

$$H\psi = E\psi \quad (3)$$

Para que uma partícula possa transacionar entre quaisquer dois níveis de energia, ela deverá absorver ou emitir exatamente a diferença de energia entre eles. No caso de elétrons (em um átomo ou em uma molécula, por exemplo), isso pode se dar através da absorção ou emissão de fótons. É possível resumir essa afirmação em uma simples equação de conservação de energia:  $E_2 - E_1 = h\nu$ , onde  $E$  é a energia,  $h\nu$  é o fóton e  $E_2 > E_1$ . Desde a fotossíntese, ao ciclo fotoquímico do ozônio-oxigênio na atmosfera, aos danos fotoquímicos no DNA provocados pela luz UV, ao funcionamento de diodos emissores de luz e de células fotovoltaicas, ou até na fotoquímica de corantes na conservação de obras de arte, transições eletrônicas são absolutamente centrais e entendê-las é de grande importância e com implicações ambientais, de saúde, artístico-culturais e tecnológicas.

A base para compreender as transições eletrônicas é entender, primeiramente, como os elétrons se organizam internamente na matéria, quer seja em átomos, moléculas ou redes cristalinas. Devido às repulsões intereletrônicas, não é possível obter uma solução exata da equação de Schrödinger para átomos com mais de um elétron. Uma primeira aproximação seria ignorar essas repulsões e tratar os elétrons independentemente, assim a função de onda atômica seria aproximada a um produto de funções de um elétron, análogas à função de onda hidrogenóide. Esse tipo de função onda de um elétron é chamada de *orbital*. Um orbital para um elétron em um átomo é chamado de *orbital atômico*. Orbitais atômicos podem ser usados para construir funções de onda aproximadas de átomos polieletrônicos e, também, de moléculas [136].

Além de propriedades como a massa de repouso ( $m_e = 9,109382 \times 10^{-31}$  kg) e a carga elétrica ( $e = -1,6021765 \times 10^{-19}$  C), os elétrons ainda possuem uma outra propriedade muito importante de ser levada em consideração para poder entender a organização eletrônica da matéria e as transições eletrônicas, o *spin* ( $m_s$ ). O spin é o momento angular intrínseco que partículas elementares possuem e não existe um análogo clássico para ele, isto significa que ele é um efeito puramente quanto-mecânico



relativístico. A equação de Schrödinger não é uma equação relativística, por isso ela não prevê a existência de certos fenômenos. O spin do elétron foi proposto pela primeira vez em 1925 pelos físicos holandeses George Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Goudsmit (1902-1978), para poder explicar a estrutura fina observada em espectros atômicos, mas foi somente em 1928 que surgiu a mecânica quântica relativística de Paul Dirac, de onde essa propriedade surge naturalmente. A teoria de Dirac também indicava a existência de elétrons positivamente carregados, hoje conhecidos como *pósitrons*, que viriam a ser descobertos em 1932. O pósitron é a partícula de antimatéria do elétron, matéria e antimatéria são idênticas exceto pela carga elétrica, e quando se encontram se aniquilam dando origem a fótons de altíssima energia [136,137,139].

O físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) mostrou que partículas com spin fracionário (*férmions*), como os elétrons, devem possuir funções de onda antissimétricas, enquanto partículas com spin inteiro (*bósons*), como fótons, requerem funções de onda simétricas. Esse princípio postulado por Pauli traz uma consequência para sistemas de férmions idênticos (como os elétrons em um átomo polieletrônico): caso os dois férmions idênticos possuam as mesmas coordenadas espaciais, eles não poderão possuir o mesmo spin. O princípio da antissimetria de Pauli (ou princípio da exclusão de Pauli) “força” elétrons com mesmo spin a se manterem distantes uns dos outros, por isso dois elétrons só poderão ser descritos pelo mesmo orbital se seus spins forem opostos [136].

A luz fascina a humanidade há milênios. Gerações de cientistas ao redor do mundo dedicaram suas vidas a entender sua natureza e desvendar seus mistérios, mas ainda há muito a se estudar e aprender sobre essa entidade fundamental da natureza. Além da Óptica e da Quântica, outro ramo da Ciência que se empenha a estudar a luz é a Fotoquímica. Diversos pesquisadores e autores de livros da área trazem diferentes definições, por exemplo:

*“Interactions of light with matter make up the fascinating subject of photochemistry that is the subject of this book... If there is one essential feature of photochemistry, it is probably the way in which excited states of atoms and molecules (i.e. those with excess energy) play a part in the processes occurring.”* – Carol Wayne e Richard Wayne [57].

*“Photochemistry is the study of the chemical reactions and physical changes that results from interaction between matter and visible or ultraviolet light.”* e *“Photochemistry is the branch of chemistry which relates to the interactions between matter and photons of visible or ultraviolet light and the subsequent*

*physical and chemical processes which occur from the electronically excited state formed by photon absorption.” – Brian Wardle [58].*

*“Fotoquímica é o estudo de reações químicas produzidas pela luz. A absorção de um fóton de luz de luz pode levar uma molécula até um estado eletrônico excitado, onde ele terá maior probabilidade de reagir do que no estado eletrônico fundamental. Nas reações fotoquímicas a energia de ativação é fornecida pela absorção de luz.” – Ira Levine, traduzido por Edilson Clemente Silva e Oswaldo Esteves Barcia [137].*

*“When light interacts with matter, any of a number of things can happen. Most are photophysical processes – that is, the chemical structure of the molecule is unchanged in the end. Others, however, are photochemical processes – that is, the interaction of light with matter leads to any of a large array of chemical structural changes... Photochemistry is associated with electronic excitation – that is, the promotion of an electron from one orbital to a higher-lying orbital, thereby creating an excited electronic state. The energies required to do this are in the range of ultraviolet or visible light... It is this type of light that has sufficient energy to break bonds and thus do chemistry.” – Eric Anslyn e Dennis Dougherty [60].*

*“Molecular organic photochemistry is a science concerned with the structural and dynamic processes that result from the interaction of light with organic molecules. The field of molecular organic photochemistry can be conveniently classified in terms of photophysics of organic compounds (the interactions of light and organic molecules resulting in net physical changes) and the photochemistry of organic compounds (the interactions of light and organic molecules resulting in net chemical changes)... The electronically excited molecule ( $R^*$ ) is the essential species that is universal to all photochemical and photophysical processes.” – Nicholas Turro, V. Ramamurthy e J. C. Scaiano [59].*

Para todos os autores a Fotoquímica é a Ciência que estuda a interação da luz com a matéria e é comum a todos o reconhecimento de que o *estado eletronicamente excitado*, ou simplesmente *estado excitado*, é o pilar fundamental da área. A Fotoquímica se inter-relaciona profundamente com a Espectroscopia, uma outra área da Físico-Química interessada em entender a interação da matéria com as radiações eletromagnéticas. O autor do livro “Modern Spectroscopy”, J. M. Hollas, define a área da seguinte forma: *“Spectroscopy is basically an experimental subject and is concerned with the absorption, emission or scattering of electromagnetic radiation by atoms or molecules.” [140]*, a partir dessa definição é possível argumentar que não existe uma diferença profunda entre

a Fotoquímica e a Espectroscopia, uma vez que o objeto de estudo de ambas reside nos fenômenos e processos decorrentes da interação da matéria com a radiação eletromagnética. Já se sabe que a palavra “espectro” foi introduzida na Ciência por Newton e que ela deriva da palavra em Latim “*spectrum*”, que significa “aparição” ou “imagem” (referindo-se a banda colorida que surgiu ao decompor a luz branca com um prisma), já o sufixo “scopia” vem do Grego “*skopia*” e significa “observação” ou “exame”, tipicamente fazendo uso de algum instrumento [117,141]. Desta forma, etimologicamente falando, “espectroscopia” literalmente significa “observação do espectro”, o que faz sentido, pois a espectroscopia está ligeiramente mais interessada com a luz (o espectro) dentro das interações luz-matéria. A Fotoquímica, por sua vez, dá uma ênfase maior ao quesito matéria, o *estado excitado* e as suas *transformações*, mas usa amplamente os conhecimentos da Espectroscopia. Tendo em vista que não há uma diferença fundamental entre as radiações de diferentes regiões do espectro eletromagnético, além claro da energia que cada uma transporta, é possível argumentar que todas são manifestações do mesmo fenômeno luminoso, não há uma diferença fundamental entre fótons da região de raios gama para fótons do visível ou mesmo da região de ondas de rádio. Assim, Fotoquímica e Espectroscopia são dois lados de uma mesma moeda, pertencem ao mesmo ramo da “árvore da Ciência”, focadas em estudar as interações entre a luz e a matéria. A base para isso reside nos princípios sólidos da Física e da Química, bem como em aspectos da Matemática, da Engenharia e da Computação.

Existem algumas formas de se gerar uma espécie no estado excitado, uma delas é através da irradiação com luz de comprimento de onda adequado, mas também é possível por meio de uma reação térmica onde o produto formado se encontra em uma superfície de energia potencial maior do que a superfície do estado fundamental, ou ainda por meio de algum mecanismo de transferência de energia. Para todos os efeitos, o estado excitado é sempre instável e tende a decair para o estado fundamental por algum mecanismo, mas para isso a diferença de energia entre os estados deve ser conservada. Existem vários processos de decaimento do estado excitado, que competem entre si, e os fotoquímicos mensuram a eficiência destes processos através de *rendimentos quânticos* ( $\Phi$ ), cujo somatório total é equivalente a 1.

A Fotoquímica precisou esperar séculos desde os primeiros experimentos ópticos de Alhazen para poder finalmente emergir, pois antes da Ciência ter adquirido uma certa bagagem acerca da natureza da luz e da estrutura da matéria era muito difícil conseguir entender profundamente fenômenos como as reações fotoquímicas ou os processos

luminescentes. A revolução provocada pela Quântica deu aos cientistas um arsenal poderoso para interpretar os resultados experimentais ligados à fluorescência e fosforescência, bem como os estados de sistemas atômicos e moleculares (centrais para os químicos poderem entender os mecanismos das reações provocadas pela luz). Um dos pioneiros no estudo de fenômenos fotofísicos moleculares foi o físico polonês Aleksander Jablonski (1898-1980), que propôs um diagrama de energia de estados (Figura 7) em um artigo, em 1933, que viria a se tornar um pilar na Fotoquímica [142,143].

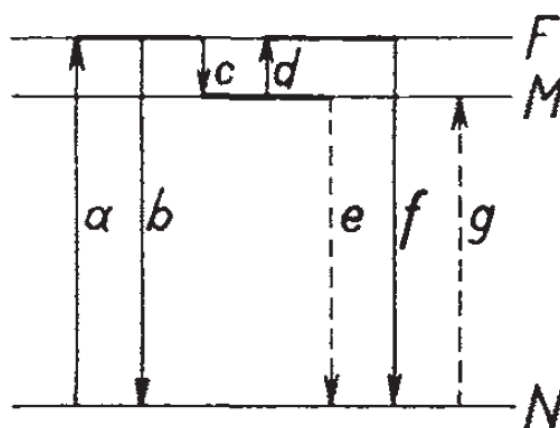
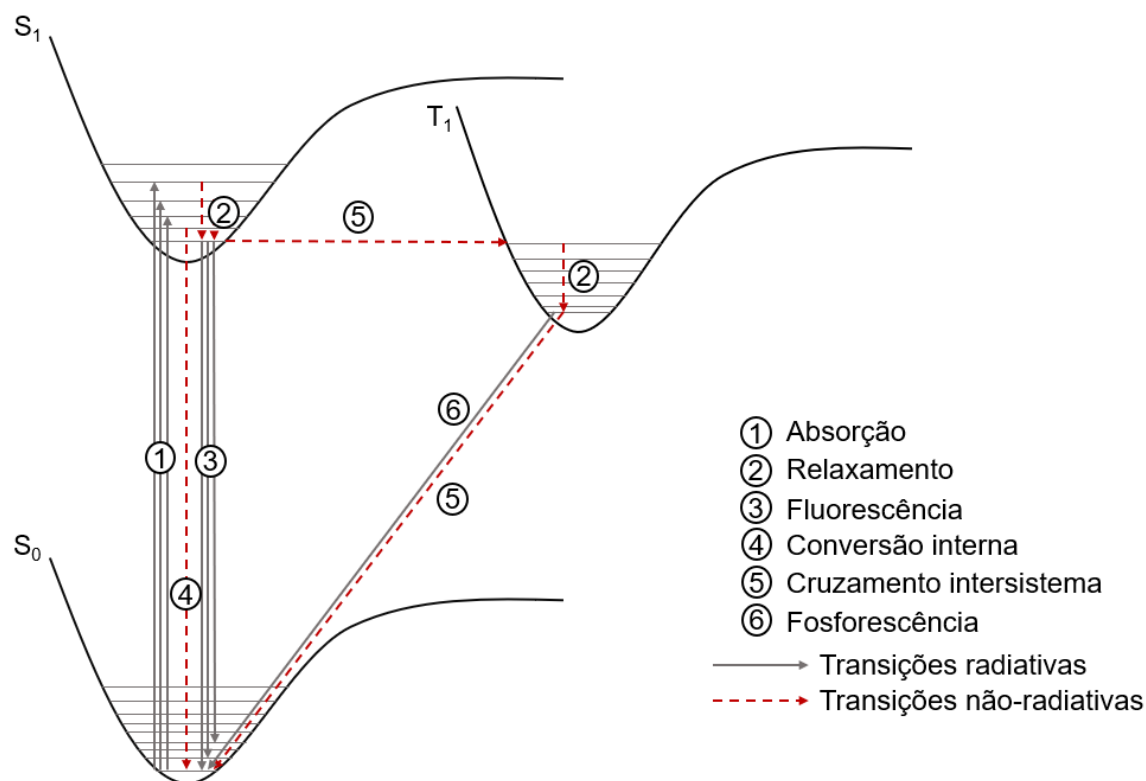


FIG. 1.—Energy levels in a phosphorescent molecule. *a*—absorption, *b*—fluorescence, *c*—transition to metastable level, *d*—thermal excitation, *e* and *f*—phosphorescence, *g*—absorption of very small transition probability.

**Figura 7.** Reprodução do diagrama de níveis de energia de uma molécula fosforescente, proposto por Aleksander Jablonski em 1933 na revista *Nature* [143].

Em seu diagrama existem três níveis de energia: *N*, *M* e *F*. O nível *N* é o “estado normal” da molécula, o que hoje se conhece por estado fundamental, os níveis *M* e *F* são estados excitados, o primeiro ele chamou de “estado metaestável” e o segundo simplesmente de “estado *F*”, que talvez seria o “estado fluorescente” devido a transição *F-N*, representada pela letra “*b*”, ser responsável pela fluorescência molecular. O diagrama dele sofreu diversas modificações posteriormente, mas não perdeu a sua essência. Em sua homenagem os fotoquímicos passaram a se referir ao diagrama de energia de estados como “Diagrama de Jablonski” (Figura 8) e ele está presente em diversos livros de Fotoquímica e Físico-Química [57,58,59,60,61].



**Figura 8.** Diagrama de Jablonski. Adaptado de: Modern Physical Organic Chemistry [60]

Para descrever adequadamente as transições eletrônicas de um sistema polieletrônico, quer seja um átomo ou uma molécula, é necessário calcular a *multiplicidade de spin* dele, que é equivalente a  $2 \cdot S + 1$ , onde  $S = \sum m_s$ . Os estados excitados diferem do estado fundamental não apenas por possuírem uma maior energia, mas porque também podem apresentar uma multiplicidade diferente. A maioria das moléculas orgânicas apresenta camada fechada no estado fundamental, além disso seria impossível dois elétrons se encontrarem descritos pela mesma função de onda e terem o mesmo valor de número quântico de spin ( $m_s$ ), pois isso violaria o princípio da exclusão de Pauli. Neste caso de compostos orgânicos, no estado fundamental a sua multiplicidade é igual a 1 (na maioria das vezes) e a espécie é dita estar no *estado singlete* (ou *singlete*, estado fundamental singlete). No estado excitado da maioria das moléculas orgânicas, a multiplicidade de spin pode ser igual a 1 ou igual a 3, assim a espécie pode ser dita como estando no estado singlete ou no *estado tripleto* (ou *tripleto*, estado excitado tripleto). As multiplicidades mais comuns para compostos orgânicos são a singlete ( $S_n$ ) e tripleto ( $T_n$ ), onde o índice  $n$  indica o nível de energia do estado, assim  $S_0$  é o estado fundamental singlete,  $S_1$  é o primeiro estado excitado singlete,  $T_1$  é o primeiro estado excitado tripleto,  $S_2$  é o segundo estado excitado singlete,  $T_2$  o segundo estado excitado tripleto, e assim

por diante. A maioria das moléculas orgânicas não possuem um estado  $T_0$ , como exceção existem apenas alguns poucos exemplos de carbenos e birradicais [144,145]. Além disso, compostos inorgânicos podem possuir este estado, o oxigênio molecular ( $O_2$ ) é um exemplo. De fato, compostos inorgânicos podem, inclusive, possuir estados de multiplicidades de spin diferentes, além do singlete e triplete [58].

Entender a multiplicidade de spin do sistema de interesse é importante porque toda transição eletrônica está sujeita às leis da Física, que impõem limitações à probabilidade de uma transição. A Mecânica Quântica pode prever a intensidade de uma transição através do cálculo da *força do oscilador*, que é controlado por *regras de seleção*: a regra de seleção de multiplicidade do spin, a regra de seleção de superposição, a regra de seleção de simetria do estado e a regra de seleção de paridade (de simetria do orbital). A Física afirma que o momento angular é uma propriedade que se conserva na Natureza, isso é verdade tanto para estrelas e galáxias quanto para elétrons e átomos. É exatamente isso que diz a regra de seleção de simetria do orbital, ela afirma o momento angular total deve se conservar para que a transição eletrônica possa ocorrer ( $\Delta\ell = \pm 1$ ). Já a regra de seleção de spin afirma que as transições eletrônicas entre estados de multiplicidades diferentes são proibidas. Entretanto esta segunda regra pode ser “relaxada” em sistemas que contêm átomos mais pesados devido a um efeito conhecido como *acoplamento spin-órbita*, um efeito relativístico no qual o spin do elétron interage com o momento magnético orbital, gerado pelo movimento do próprio elétron na região do poço de potencial criado pelo núcleo ( $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ ). Uma das consequências deste efeito é a mistura de estados de diferentes multiplicidades, tornando a divisão entre estados singlete e triplete menos precisa [58,136]. Todavia, dizer que uma transição será “permitida” ou “proibida” por uma regra de seleção não quer dizer que aquela transição ocorrerá ou que jamais ocorrerá, mas apenas que ela será mais ou menos provável, pois a físico-química por trás deste fenômeno é muito mais complexa e diversos outros fatores devem ser levados em consideração.

Uma das consequências das regras de seleção é espectroscópica, pois é possível observar uma grande diferença de intensidade nas bandas de absorção ao se comparar transições permitidas e proibidas. Um exemplo disso é o caso observado em compostos carbonilados, onde as bandas referentes a transições  $n-\pi^*$  (proibidas) são bem menos intensas do que aquelas referentes a transições  $\pi-\pi^*$  (permitidas), isso é consequência da regra de seleção de simetria do estado [58,59]. Outra consequência é observada na

cinética dos estados excitados, onde é possível observar um tempo de vida ( $\tau$ ) muito maior para transições proibidas, sendo possível perceber inclusive macroscopicamente pela diferença de tempo de emissão luminosa nos processos de fluorescência e fosforescência. A fluorescência é um dos diversos fenômenos luminescentes conhecidos na Natureza, seu tempo de vida varia entre  $10^{-12}$  e  $10^{-7}$  segundos. Já a fosforescência ocorre em uma escala de tempo muito maior, com seu tempo de vida variando entre  $10^{-6}$  e  $10^2$  segundos. Essa diferença de  $\tau$  da fluorescência e da fosforescência é uma consequência da regra de seleção de spin, pois, por definição, fluorescência é a emissão de luz provocada por uma transição eletrônica entre estados de mesma multiplicidade, enquanto a fosforescência é a emissão de luz provocada por uma transição eletrônica entre estados de multiplicidade diferente, processo que é proibido, pois violaria o princípio da exclusão de Pauli. Desta forma, antes que o elétron excitado possa retornar ao estado fundamental é necessário que haja uma inversão de spin. Mas na Química não há fenômeno algum capaz de competir com a absorção de um fóton por um elétron, e a subsequente transição eletrônica, pois este processo se dá em uma escala de tempo da ordem de  $10^{-15}$  segundos, ou *femtosegundos*. Existem fenômenos na Natureza mais rápidos, mas são de maior interesse dos físicos nucleares e de partículas (como o tempo de vida de partículas produzidas no *Large Hadron Collider*, como o *bóson de Higgs*, que possui  $\tau$  da ordem de  $10^{-22}$  segundos, ou o *top quark*, cujo  $\tau$  é da ordem de  $10^{-25}$  segundos) e por isso, para todos os efeitos, tempos menores do que os da ordem de femtosegundo não são tão relevantes para os químicos [59,146,147]. Para se ter uma dimensão do quão curto um femtosegundo é, pode-se fazer a seguinte comparação: 1 femtosegundo está para 1 segundo assim como 1 segundo está para 31.709.792 anos.

É dispondo de todo este arcabouço teórico que os fotoquímicos são capazes de estudar e compreender os fenômenos fotofísicos e fotoquímicos da matéria. Hoje se conhecem diversos processos fotofísicos, que vão desde a absorção e emissão de luz a processos de transferência de energia no estado excitado, e diversas classes de reações fotoquímicas, por exemplo as reações de fotólise, foto-redox, reações de abstração de hidrogênio, fotoisomerização, reações pericíclicas fotoquímicas, dentre outras. As implicações destes conhecimentos vão desde entender o funcionamento da visão e do ciclo circadiano, a síntese fotoquímica da vitamina D e de fármacos, ao desenvolvimento de novas tecnologias optoeletrônicas como *OLEDs* e células fotovoltaicas mais eficientes, entender o mecanismo de funcionamento e a preservação da camada de ozônio, a conservação de obras de arte, ou o funcionamento da fotossíntese e a busca por uma forma

de mimetizá-la para fins de interesse da sociedade etc [57,58,59,60]. A Fotoquímica é uma Ciência interdisciplinar, que dialoga com diversas áreas, que busca entender questões fundamentais do Universo, propor soluções criativas para problemas e criar tecnologias baseadas em conhecimento científico de fronteira. Ela é uma Ciência jovem, mas suas bases são antigas e sólidas. No seu cerne está o seu paradigma central: o estado excitado. Assim como os biólogos dizem que na Biologia nada faz sentido a não ser aos olhos da Evolução por Seleção Natural, é válido argumentar que na Fotoquímica nada faz sentido a não ser aos olhos do estado excitado, pois tudo passa por ele.



## 5. METODOLOGIA

A análise da evolução histórica da Fotoquímica foi realizada com base na Filosofia da Ciência do físico e filósofo estadunidense Thomas Kuhn, referencial teórico deste trabalho, a partir da leitura do seu livro *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Foram selecionados na literatura artigos sobre a história da Fotoquímica e artigos de alguns físicos e químicos que contribuíram para esta área. As discussões sobre a importância de se ensinar fundamentos de Fotoquímica na Educação Básica foram feitas com base na Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

O domínio de conceitos ligados a interação luz-matéria de alunos do curso de Licenciatura em Química do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ-UFRJ) foi avaliado através de um questionário contendo 17 perguntas, 12 objetivas e 5 discursivas. Além do questionário, foi elaborado um termo de consentimento livre e esclarecido, assinado por todos os alunos participantes da pesquisa, contendo informações sobre a natureza do trabalho e autorizando e concedendo o uso dos dados obtidos para os devidos fins. Ambos os documentos se encontram no apêndice deste trabalho. Foram voluntariamente avaliados, ao todo, 46 alunos de diversos períodos do curso de Licenciatura em Química do IQ-UFRJ. A pesquisa foi realizada durante o segundo semestre letivo de 2019 na UFRJ (05/08/2019 – 14/12/2019).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Uma breve História da Fotoquímica no mundo e no Brasil

Antes de qualquer coisa vale ressaltar que análises históricas, assim como qualquer trabalho humano, estão sempre situadas em algum contexto social, cultural, temporal, político, geográfico e as experiências do autor. Analisar a História envolve realizar escolhas sobre quais eventos e personagens destacar, isso é algo que inevitavelmente reflete a subjetividade e a perspectiva de cada pessoa. Por mais que à primeira vista possa parecer simples analisar objetivamente a História, afinal “basta buscar por neutralidade e atentar-se apenas aos fatos”, isso não é possível! É impossível saber todos os idiomas, conhecer todos os fatos e as entrelinhas de todas as histórias, porém é possível pesquisar muito, ler muito, debater e buscar se alinhar ao que existe documentado. Pelo simples fato de se escolher quais histórias contar e quais personagens destacar, acaba se contando algo sobre a subjetividade do próprio autor. Por isso neste trabalho alguns pesquisadores receberam mais ênfase do que outros, não seria possível falar sobre todos os fotoquímicos que existiram e essa não é a intenção. Esta é a minha forma de narrar uma breve História da Fotoquímica.

Ao longo da História diversos cientistas se interessaram em estudar as estruturas e os processos dinâmicos que decorrem das interações da luz com a matéria. A partir dos esforços de centenas de pesquisadores, dentre químicos, físicos e farmacêuticos, a Fotoquímica se estabeleceu, tornando-se um dos ramos da imensa árvore do conhecimento humano. Através dela nossa espécie é capaz de olhar para a Natureza e entender melhor como e porque a luz e a matéria interagem. Em posse desses conhecimentos, as pessoas são capazes de explorar estes fenômenos em prol do benefício de todos, além de poder pensar em alternativas tecnológicas para garantir um desenvolvimento sustentável.

Do ponto de vista histórico a Fotoquímica ainda é uma ciência muito jovem e é difícil estabelecer uma data exata para o seu surgimento, justamente pelo fato de que, desde os primórdios do que se classifica hoje como “Ciência”, os primeiros cientistas já estavam cientes que havia uma relação íntima entre a luz e a matéria, antes mesmo do surgimento dos paradigmas modernos da Óptica, da Quântica e da Química. Por exemplo, em 1790 o teólogo e cientista inglês Joseph Priestley (1733-1800) considerava a luz como um “princípio químico” e um agente importante no mundo natural, capaz de provocar

transformações [148]. Os paradigmas aos quais a comunidade científica atual é adepta certamente não são uma mera evolução daqueles aos quais Priestley era, diversas revoluções científicas ocorreram nos últimos 230 anos, mas o fato de que a luz é capaz de provocar transformações na matéria, e vice-versa, não mudou. Seria então Priestley o primeiro fotoquímico? Provavelmente não, mas a historiografia é um trabalho complexo e repleto de nuances.

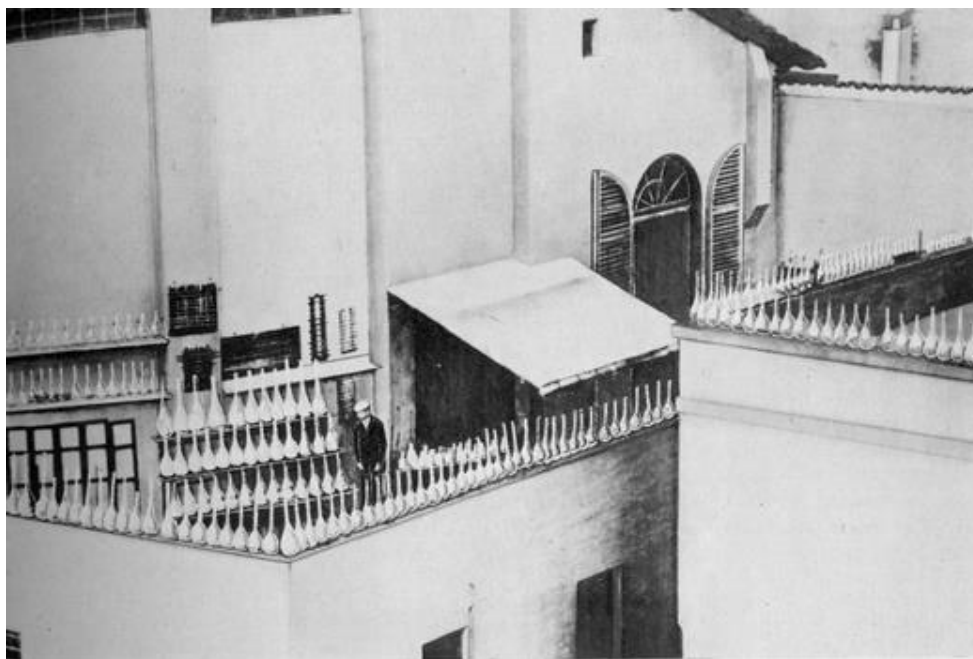
Ao longo do século XIX muitos cientistas foram pioneiros nos estudos de reações químicas provocadas pela luz e seus trabalhos ajudaram a construir as fundações onde a Fotoquímica viria a se firmar. Porém naquele século este ramo da ciência ainda não estava consolidado como uma área por si só. Uma das primeiras reações fotoquímicas que se tem registro é a do composto orgânico “santonina”, um produto natural que ocorre nas folhas e flores de diversas plantas do gênero *artemisia* e que possui ação farmacológica anti-helmíntica. Em 1834, a reação fotoquímica da  $\alpha$ -santonina foi estudada pelo químico e farmacêutico alemão Herman Trommsdorff (1811-1884). Ao ser exposta à luz solar, os cristais brancos da  $\alpha$ -santonina se tornavam amarelos e explodiam. Trommsdorff investigou a dependência desta reação ao comprimento de onda da luz incidente e observou que somente os comprimentos de onda pertencentes à região do violeta e do azul no espectro visível eram capazes de provocar a transformação, enquanto os demais (verde, amarelo, laranja e vermelho) não provocavam a transformação observada nos cristais [148].

Este trabalho do Trommsdorff motivou outros cientistas a investigarem esta e outras reações fotoquímicas, como o químico italiano Fausto Alessandro Sestini (1839-1904), que conduziu diversos estudos de irradiação da santonina em diferentes solventes. Os trabalhos pioneiros de Sestini foram um grande estímulo para a Fotoquímica italiana. Ele trabalhou por um período com o famoso químico italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910), apresentou-lhe os problemas intrigantes das reações fotoquímicas e eles chegaram a publicar um artigo juntos. Depois, ambos passaram a trabalhar independentemente nos problemas estruturais dos produtos da reação fotoquímica da santonina. Apesar de muito progresso ter sido feito, diversas questões permaneceram em aberto e alguns produtos e intermediários só foram elucidados em meados do século XX, quando os cientistas dispunham de um arcabouço teórico e experimental mais robusto. Isso aconteceu porque os paradigmas químicos e a instrumentação técnica do século XIX ainda não eram capazes de fornecer aos cientistas as ferramentas necessárias para solucionar completamente todas as questões ligadas a esta reação. Cannizzaro sempre deu muito

crédito ao Sestini, pois ele foi um personagem muito importante na História da Fotoquímica e merece reconhecimento tanto por seus trabalhos quanto por ter introduzido outros cientistas nas pesquisas sobre as transformações da matéria provocadas pela luz [148].

Mais cientistas do que é possível de se enumerar brevemente contribuíram de forma pioneira na descoberta de diversas reações fotoquímicas: Fritzsche (1808-1871), Liebermann (1842-1914), Perkin (1838-1907), Klinger (1853-1945), são os nomes, de alguns químicos, dentre tantos de diversas nacionalidades, dos que contribuíram para fundar as primeiras bases da área neste período pré-paradigmático da Fotoquímica, onde ela ainda estava sendo “gestada” [148]. Cada uma dessas pessoas mereceria um capítulo inteiro para contar sua história e falar sobre suas descobertas, mas, infelizmente, às vezes se faz necessário encurtar, e até mesmo cortar, pedaços da História completa ao se construir a narrativa.

Dentre tantos químicos, famosos ou não, que se envolveram com a investigação de reações químicas provocadas pela luz, uma pessoa não poderia jamais ser esquecida nesta história e merece uma posição de destaque na Fotoquímica: o químico austríaco-italiano Giacomo Ciamician (1857-1922). Ciamician foi um dos alunos de Cannizzaro e estudou profundamente ao longo de sua carreira diversos fenômenos fotoquímicos. Seu laboratório de Fotoquímica, no começo do século XX, era o telhado da Universidade de Bolonha, repleto de centenas de balões com dezenas de litros de soluções que ficavam expostas à luz solar por meses, para que as reações fotoquímicas pudessem ocorrer e gerar os produtos que seriam estudados (Figura 9). Ciamician dedicou sua vida à Fotoquímica e um fato histórico que merece ser lembrado foi uma palestra, quase que profética, dada por ele em um congresso internacional de Química em Nova Iorque, em 1912, intitulada “The Photochemistry of the Future”, onde ele resume o estado atual ao qual a área havia chegado e suas previsões para o futuro, enfatizando – há mais de um século – sobre a necessidade de a Humanidade buscar por fontes alternativas e mais limpas de energia, que fossem preferencialmente renováveis, pois o uso excessivo de carvão iria levar a uma catástrofe ambiental sem precedentes. Nesta palestra ele falou sobre os potenciais do uso da energia solar, embasando racionalmente o que na época era apenas um sonho e que hoje, no começo do século XXI, nós já podemos usufruir [148,149,150,151,152].



**Figura 9.** Ciamician com seus balões expostos à luz solar no telhado do prédio de Química da Universidade de Bolonha [152].

Apesar de todas as dificuldades teóricas e experimentais da época, Ciamician e seus colaboradores realizaram diversos estudos sistemáticos de várias reações fotoquímicas, por exemplo: reações de fotorredução, foto-pinacolização, fotocicloadição, fotólise etc. É difícil não reconhecer o Ciamician como um tremendo entusiasta e visionário da Fotoquímica, que tinha uma mentalidade muito diferente daquela de seus contemporâneos. Por mais que demarcar alguém para ser coroado como o “pai” de uma área seja um processo subjetivo e difícil, provavelmente o Ciamician é um dos que mais merecem este título. Ele não era apenas um grande fotoquímico, ele era uma pessoa com a mente além do século XX, um cientista além do seu tempo. Giacomo Ciamician contribuiu imensamente para as fundações teóricas e metodológicas da Fotoquímica. Além disso, ele demonstrava preocupação por questões ambientais que viriam afligir a população mundial futuramente, como o uso excessivo de fontes de energia fósseis e todos os impactos que se derivariam disso, ele também ambicionava questões ligadas à biotecnologia e visionava sobre temas como a fotossíntese artificial [150,151,152]. A Fotoquímica foi gestada ao longo dos primórdios da Ciência, para emergir de fato, formalmente como uma linha de pesquisa independente, no começo do século XX. Apesar das imensas contribuições de Trommsdorff, Sestini, Cannizzaro e de centenas de

outros pesquisadores, que podem ser considerados como os primeiros fotoquímicos, Giacomo Ciamician é o pai da Fotoquímica.

Foi também no começo do século XX que grandes revoluções ocorriam em outros ramos da Ciência. A Relatividade e a Mecânica Quântica trouxeram consigo impactos para além da Física. Muitas áreas, dentre elas a Fotoquímica, se beneficiaram e amadureceram muito graças a essas revoluções científicas. A Quântica abriu portas para que os fotoquímicos pudessem entender os processos mais elementares da interação da luz com a matéria, permitindo com que a área avançasse a passos largos. Não é mais possível pensar em Fotoquímica sem pensar em quantização de energia, em níveis de energia, em estados ou em fótons. O nome “fóton”, para o quantum de luz, a comunidade científica deve ao físico-químico estadunidense Gilbert Newton Lewis (1875-1946). Mas Lewis fez muito mais para a Fotoquímica do que apenas batizar os fótons em 1926, ele e seu aluno Michael Kasha (1920-2013) também reconheceram a importância do estado excitado triplete na fosforescência de moléculas orgânicas [153,154,155].

Ainda no século XX, em 1933, o físico polonês Aleksander Jablonski (1898-1980) publicou seu artigo “Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes” na revista Nature [143]. Seu diagrama (presente na Figura 7 deste trabalho) é um pilar para a Fotoquímica, pois nele se encontram esquematizados, de forma elegante e resumida, o estado fundamental, dois estados excitados e diversos fenômenos fotofísicos. Mas foi graças a Lewis e Kasha que o diagrama de energia de estados tão utilizado pelos fotoquímicos foi batizado como “Diagrama de Jablonski”, pois foram eles que se referiram pela primeira vez ao diagrama do físico polonês desta forma, em 1944, no artigo onde eles identificaram o estado excitado triplete como o responsável pela fosforescência [156]. Provavelmente a reputação de Lewis na comunidade científica, sendo um dos químicos mais famosos e influentes na história desta Ciência, teve um papel importante para que o nome “Diagrama de Jablonski” se tornasse popular. O trecho retirado do artigo “*Phosphorescence and the Triplet State*” pode ser visto a seguir e mostra quando exatamente o diagrama ganhou este nome:

*“The property of afterglow, or phosphorescence, in spite of its inherent interest and practical importance, has seemed far removed from more commonly studied physical and chemical properties. We propose, however, to show that a spectroscopic study of phosphorescence provides quantitative data concerning an extremely important state of every type of molecule, the triplet state... The first step in the interpretation of the alpha and beta processes we*

*owe to Jablonski. He assumed a metastable or phosphorescent state lying below the fluorescent state. From this phosphorescent state a molecule could pass directly to the ground state by the beta process, or it could be activated thermally to the energy of the fluorescent state and then return to the ground state by the alpha process. This theory was quantitatively verified by Lewis, Lipkin and Magel and we reproduce in Fig. 1 their Jablonski diagram for fluorescein in boric acid glass, to which we have added our own determination of the energy of the second electronically excited state of fluorescein in an acid medium.” [156]*

Neste artigo, o Diagrama de Jablonski já possuía muito mais semelhança com a sua versão mais atual e amplamente usada em livros e artigos (Figura 10). As letras “S” e “T” se referem aos estados singlete e triplete, respectivamente. O eixo vertical representa a energia do estado, em Kcal, que cresce de baixo para cima. Outro fato curioso é que neste diagrama não estão representados somente os níveis de energia eletrônicos dos estados, mas também os níveis vibracionais, que não estavam presentes no diagrama original do Jablonski. As setas marcadas pelas letras gregas indicam transições radiativas entre os estados, onde “ $\alpha$ ” simboliza a fluorescência e “ $\beta$ ”, a fosforescência. Também se encontram destacados outros estados excitados, de maior energia, o que não havia no diagrama do Jablonski. Com isso fica evidente o quanto se avançou teoricamente em tão pouco tempo, uma vez que ambas as publicações possuem apenas 11 anos de diferença.

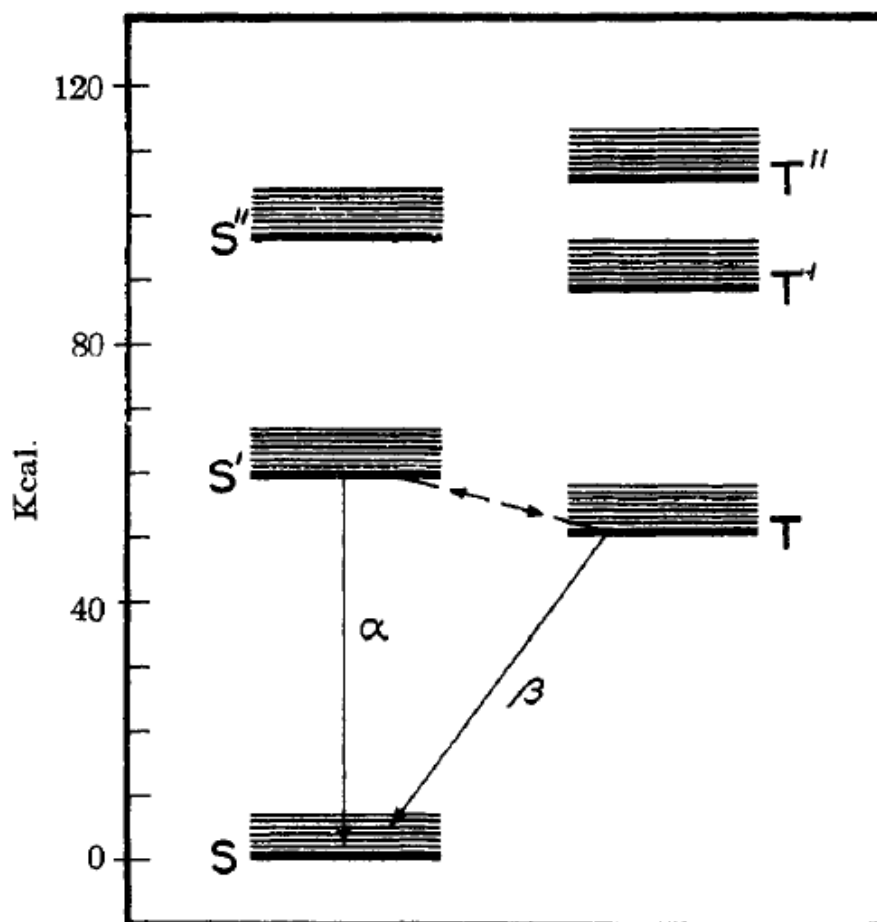


Fig. 1.—Jablonski diagram for fluorescein in boric acid glass (in part after Lewis, Lipkin, and Magel<sup>10</sup>).

**Figura 10.** Reprodução do primeiro “Diagrama de Jablonski” da História, presente no artigo de Lewis e Kasha sobre a fosforescência e o estado tripleto. [156]

Os autores mencionam no trecho destacado e na sua figura com o Diagrama de Jablonski (Figura 10) outro diagrama, presente em um artigo publicado por Lewis, Lipkin e Magel em 1941 no *Journal of the American Chemical Society*, intitulado “*Reversible Photochemical Processes in Rigid Media. A Study of the Phosphorescent State*”. Neste artigo de 1941 há algumas menções ao trabalho do físico polonês e existe um diagrama de energia que deriva daquele do Jablonski de 1933, o estado fundamental ainda é representado pela letra “N” e existem estados excitados “F” e “P”, mas já com algumas adaptações, como a inclusão dos níveis vibracionais (Figura 11) [157]. Apesar deste diagrama possuir todos os elementos que, aos olhos de hoje, são típicos de qualquer Diagrama de Jablonski, Lewis, Lipkin e Magel nunca se referiram a ele desta forma, na verdade eles usaram mais de uma vez no texto a expressão “*scheme of Jablonski*”



(esquema de Jablonski). Quem se referiu a este diagrama da Figura 11 como “Diagrama de Jablonski” foram Lewis e Kasha 3 anos mais tarde. Os fotoquímicos não usam a expressão “Esquema de Jablonski”, usam “Diagrama de Jablonski”, por isso o diagrama presente na Figura 11 pode ser considerado como uma versão embrionária, enquanto o da Figura 10 é o primeiro Diagrama de Jablonski, de fato, na História. Assim, o crédito pelo batismo do diagrama permanece com Lewis e Kasha.

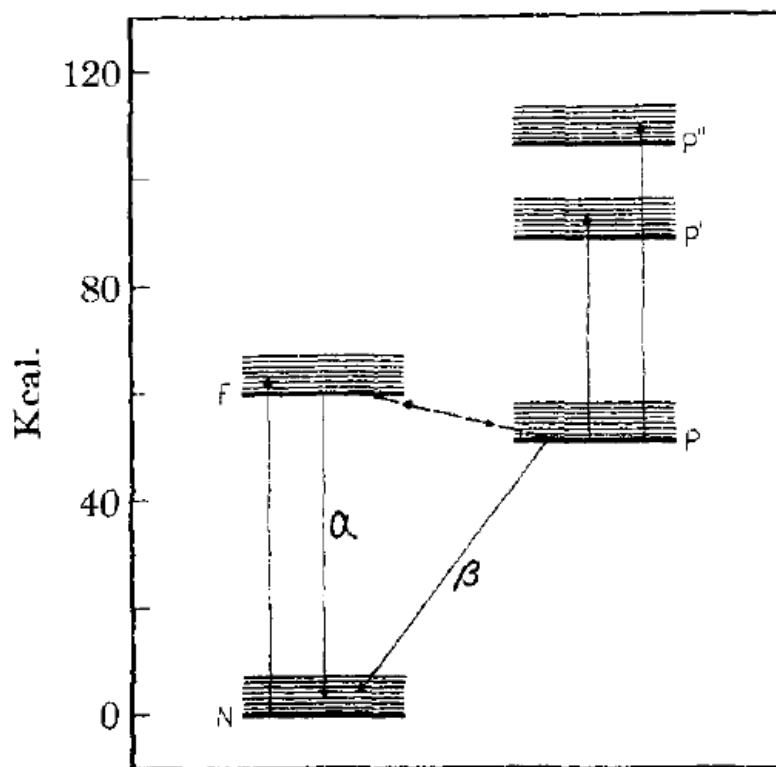


Fig. 9.—Energy diagram of fluorescein in boric acid.

**Figura 11.** Reprodução do "Esquema de Jablonski", presente no artigo de Lewis, Lipkin e Magel. [157]

Neste artigo de 1941, os autores discorrem sobre a fosforescência e o “estado fosforescente”. Eles especulam, inclusive, sobre a possibilidade deste estado “P” ser, na verdade, o estado tripleto:

*“The second reasonable assumption is that in the P state the atomic configuration is approximately the same as in the N state, but that one is an electromer of the other, such as a triplet state (biradical), which has a low probability of returning to the normal state because of quantum inhibitions.”*  
[157]

O artigo “*Phosphorescence and the Triplet State*”, de Lewis e Kasha, não é importante apenas pelo seu Diagrama de Jablonski, mas principalmente pelo tremendo marco que foi o reconhecimento do estado excitado triplete como sendo o responsável pela emissão de fosforescência observada em algumas moléculas orgânicas. Resgatando alguns conceitos da Filosofia da Ciência de Kuhn, é possível argumentar que ao reconhecer a natureza triplete do “estado metaestável” e ao caracterizar que a origem da fosforescência residia em transições entre estados de diferentes multiplicidades (no caso, do estado triplete excitado para o estado singlete fundamental), Lewis e Kasha provocaram uma revolução científica dentro da Fotoquímica.

Kuhn afirma que a ciência normal é baseada em realizações passadas, reconhecidas por uma comunidade científica durante algum período e que isso proporciona os fundamentos para a prática científica. A ciência normal opera segundo seu(s) paradigma(s) e cientistas membros de uma mesma comunidade trabalham em consonância quanto a quais são os problemas relevantes, quais são as metodologias aceitas na solução destes problemas e quais padrões de resposta são aceitáveis dentro da comunidade. Kuhn explica que a aquisição de um paradigma é um sinal de maturidade de qualquer campo científico e que a ciência normal trabalha debaixo do guarda-chuva deste paradigma. O objetivo da ciência normal é refinar, ampliar e articular o paradigma vigente, jamais corrigi-lo. Mas o filósofo reconhece que na evolução da Ciência existe outra forma de produção de conhecimento, uma de caráter não cumulativo, que rompe com o paradigma vigente, em um processo que ele chamou de revolução científica: esta é a ciência extraordinária. A revolução científica é esta transição de um paradigma antigo a um novo. A grande maioria dos cientistas trabalham durante toda a sua carreira dentro de um regime de ciência normal, sem nunca praticar ciência extraordinária e provocar revoluções científicas, o que não é menor nem é demérito algum, pois muitos podem desenvolver trabalhos brilhantes. Não deve haver juízo de valor entre a ciência normal e a ciência extraordinária, ambas são igualmente importantes para a produção de conhecimento científico. Alguns cientistas, entretanto, podem realizar trabalhos extraordinários (no sentido kuhniano) e provocar uma revolução dentro da área.

Kuhn argumenta que revoluções científicas não são meras reinterpretações dos fatos, os cientistas que as experimentam passam a trabalhar em um mundo diferente, olhando para o mesmo conjunto de fenômenos, mas sob a lente de um novo paradigma e se defrontando com coisas novas que o antigo paradigma não os permitia ver. Através de

revoluções científicas, os cientistas, agora guiados por um novo paradigma, adotam novos métodos, novos problemas, novos instrumentos e padrões de solução. A revolução científica provoca um completo deslocamento da rede conceitual de uma comunidade científica. Paradigmas diferentes são incomensuráveis, é como comparar futebol, basquete, vôlei e handebol, são jogos diferentes onde há “elementos” como jogadores, juízes e bolas, mas as técnicas e as regras são completamente distintas entre si. Como ele fala em *A Estrutura das Revoluções Científicas*: “Lavoisier viu oxigênio onde Priestley viu ar desflogistizado e outros não viram absolutamente nada. Contudo, ao aprender a ver o oxigênio, Lavoisier teve também que modificar sua concepção a respeito de muitas outras substâncias familiares.” [56].

Uma vez que o objetivo da ciência normal não é romper com o paradigma, algo deve provocar isso, algo deve explicar como esta forma de ciência acaba sendo tão efetiva em levar às revoluções. Kuhn explica que, na verdade, quanto mais preciso for o paradigma, mais eficaz ele será em apontar anomalias científicas. Isso se deve ao rigor que o paradigma impõe à comunidade, garantindo aos cientistas que eles possam trabalhar sem se questionar sobre os fundamentos da área constantemente. Anomalias são contrárias às expectativas e regularidades geradas pelo paradigma, não são algo para que os cientistas foram preparados para enfrentar e por isso muitas vezes falham em perceber sua existência, ou mesmo em levá-las a sério como problemas relevantes. Anomalias se tornam um problema maior quando permanecem por muito tempo sem que o paradigma hegemônico consiga prover uma solução, pois elas acabam penetrando profundamente na comunidade científica e instaurando um estado de crise. Crises atacam paradigmas, afrouxam as regras da ciência, permitindo com que novos paradigmas competidores emergjam. Kuhn fala que a ciência em período de crise se assemelha àquela em períodos pré-paradigmáticos. Entretanto, teorias científicas só se tornam inválidas se existirem alternativas para substituí-las, por isso que ao decidir rejeitar um paradigma se está, simultaneamente, aceitando outro.

O filósofo também ressalta que muitas vezes a História de uma ciência acaba sendo distorcida, não é algo feito com más intenções, mas acaba fazendo parecer como se os cientistas do passado tivessem trabalhado sob o mesmo conjunto de regras e sob o regime do mesmo paradigma que os contemporâneos trabalham. Isso não é verdade e gera a falsa impressão na comunidade de que a evolução do conhecimento científico é apenas linear e cumulativa. É possível encarar que, de certa forma, a fosforescência era uma anomalia luminescente, uma exceção à luminescência “instantânea” comum e observada

em diversas substâncias (fluorescência). Entender e explicar a fosforescência era um desafio para muitos. Os paradigmas mais recentes sobre a luminescência tiveram de incorporar respostas para perguntas como: Por que algumas substâncias são capazes de fosforescer e outras não? Por que a fosforescência é lenta e a fluorescência é rápida? O que acontece com a matéria para que ela seja capaz de exibir fosforescência? Antes do trabalho de Lewis e Kasha houve o trabalho de diversos outros cientistas, dentre físicos e químicos, para se tentar responder a essas perguntas. Após Lewis e Kasha houve um rompimento da comunidade fotoquímica com o estado “metaestável” e uma adesão ao estado triplete. A aparente metaestabilidade do “estado fosforescente” poderia ser explicada pela Mecânica Quântica como uma consequência direta do Princípio da Exclusão de Pauli, que proíbe por spin a transição eletrônica do estado excitado para o estado fundamental quando a espécie excitada apresenta uma multiplicidade diferente daquela do fundamental. A fosforescência é uma forma de se observar algo íntimo da natureza dos elétrons, puramente quanto-mecânica, com implicações no mundo macroscópico e na escala de tempo das pessoas e não na dos átomos, moléculas e fótons. Não é que alguns estados excitados sejam “metaestáveis” e outros não, a “metaestabilidade” do “estado fosforescente” é apenas aparente, na verdade todos os estados excitados são instáveis e sempre tendem a decair para o estado fundamental, mas a Natureza proíbe certas transições de ocorrerem caso alguma regra fundamental seja violada.

Este novo paradigma para os estados excitados foi bem sucedido em solucionar o problema da fosforescência e ganhou adeptos, por isso ele cresceu e prosperou nos últimos 76 anos, ganhou espaço na comunidade fotoquímica, e na comunidade científica de uma forma geral, ganhou espaço nos livros técnicos da área e em artigos científicos, ganhou estabilidade como um pilar. A partir de então os cientistas passaram a prestar atenção na multiplicidade do estado, com consciência de que ela importa para o tipo de processo que este estado sofrerá. Se hoje essas coisas parecem óbvias, com certeza elas não eram 100 anos atrás. Os cientistas do passado não tinham isso como o “certo”. É sutil, mas o estado triplete excitado e o estado metaestável não são a mesma coisa, um não é a evolução do outro, são paradigmas incomensuráveis. Lewis e Kasha provocaram uma revolução científica, uma tremenda mudança de paradigma para a comunidade fotoquímica. Muitos não viram nada além de ar, Priestley viu ar desflogistizado, Lavoisier viu oxigênio. Muitos não viram nada além de um brilho persistente, Jablonski viu um estado metaestável, Lewis e Kasha viram triplete. Hoje se sabe que estados excitados

triplete são ubíquos na Natureza e muitos fenômenos de interesse dos fotoquímicos, além da fosforescência, podem ocorrer a partir deste estado excitado, como processos de transferência de energia, reações de fotossensibilização, fotoisomerização, abstração de hidrogênio, fotopinacolização etc. [59].

O paradigma fotoquímico é o estado excitado ( $R^*$ ), nada faz sentido na Fotoquímica senão sob a égide de  $R^*$ , que pode ter diferentes multiplicidades, cada uma influenciando diretamente nos processos que a espécie sofrerá. Lewis e Kasha tiveram carreiras brilhantes na Química e contribuíram imensamente para a Fotoquímica, ajudando a sedimentar mais ainda o paradigma fotoquímico. Michael Kasha ainda é lembrado pelos fotoquímicos pela sua “Regra de Kasha”, que em termos simples diz que os processos fotofísicos e fotoquímicos normalmente se iniciam a partir do estado excitado de menor energia, do  $S_1$  e do  $T_1$ , independentemente de qual estado excitado tenha sido produzido inicialmente ( $S_N$  ou  $T_N$ ) [59]. Nas palavras do próprio Kasha: “*The emitting level of a given multiplicity is the lowest excited level of that multiplicity*” [158]. Esta regra não é uma verdade absoluta e são conhecidas substâncias que a violam, por exemplo o azuleno, substância orgânica que exibe emissão anômala de fluorescência a partir do  $S_2$ . Entretanto, esta anomalia não configura risco algum ao paradigma fotoquímico, uma vez que ele é capaz de dar conta de explicá-la. A fluorescência anômala a partir do  $S_2$  e a ausência de fluorescência a partir do  $S_1$  do azuleno é consequência de uma diferença energética pequena entre seus estados  $S_1$  e  $S_0$ , o que resulta em uma alta taxa de conversão interna<sup>1</sup> de volta para o estado fundamental, e uma diferença grande entre o  $S_2$  e o  $S_1$ , levando a uma baixa taxa de conversão interna entre esses estados. Como a desativação do estado excitado é uma competição de diversos processos de diferentes velocidades e a conversão interna é mais rápida do que a fluorescência, predomina a emissão de fluorescência a partir do  $S_2$  no azuleno [59].

Algo importante de se pontuar na História da Fotoquímica é que Aleksander Jablonski não foi o primeiro cientista a propor e usar um diagrama de energia de estados para esquematizar e tentar explicar fenômenos luminescentes em moléculas. O primeiro cientista a usar diagramas de energia em moléculas no contexto de absorção e emissão de

---

<sup>1</sup> A conversão interna é um processo fotofísico causado por uma transição isoenergética não-radiativa entre dois estados eletrônicos da mesma multiplicidade. Quando a transição resulta em uma entidade molecular vibracionalmente excitada do estado eletrônico inferior, este geralmente é desativado ao seu nível vibracional mais baixo, desde que o estado final não seja instável à dissociação [194].

luz foi, provavelmente, o físico francês Jean Perrin (1870-1942). Posteriormente Francis Perrin (1901-1992), filho de Jean, trabalhou no laboratório de seu pai e deu continuidade aos estudos sobre a luminescência molecular e os fenômenos fotofísicos associados. O diagrama proposto por Jean Perrin em 1920 já continha, muito antes de Jablonski publicar o seu em 1933, um estado fundamental e estados excitados, sendo um deles um nível de energia metaestável. A tese de doutorado em Física de Francis, defendida em 1929, também abordou questões ligadas à luminescência molecular e Fotoquímica (*La Fluorescence des Solutions – Induction Moléculaire – Polarisation et Durée d’Émission. – Photochimie.*). Com base no reconhecimento das contribuições históricas dos Perrin para a luminescência molecular, alguns autores e historiadores da ciência argumentam que um nome melhor para o diagrama de energia de estados usado pelos fotoquímicos seria “Diagrama de Perrin-Jablonski” [159].

Na segunda metade do século XX, em 1967, dois grandes nomes da Fotoquímica foram laureados com o Prêmio Nobel de Química: Ronald George Wreyford Norrish (1897-1978) e George Porter (1920-2002). O prêmio foi compartilhado entre os dois químicos britânicos, Norrish e Porter, e o químico alemão Manfred Eigen (1927-2019) por “seus estudos de reações químicas extremamente rápidas, afetadas pela perturbação do equilíbrio por meio de pulsos muito curtos de energia” [160]. As pesquisas de Norrish englobavam diversas áreas como a Fotoquímica, a Espectroscopia e a Cinética Química [161,162]. Ele é lembrado também pelas reações fotoquímicas de compostos carbonilados, que receberam o nome “Reações de Norrish” em sua homenagem, subdivididas em Reações de Norrish de Tipo I e Tipo II. Estas reações são de grande relevância não só na Fotoquímica, mas também em áreas como a Síntese Orgânica, Química Atmosférica, Química Ambiental e Polímeros [58,59,60,163,164,165]. Porter foi um dos alunos de pós-graduação de Norrish em Cambridge, suas primeiras pesquisas envolviam a investigação de radicais livres produzidos em reações fotoquímicas gasosas. Em 1946 ocorreu-lhe a ideia de usar pulsos curtos de luz, de duração menor do que o tempo de vida dos radicais livres, para poder investigar melhor os transientes gerados fotoquimicamente. Porter e Norrish iniciaram, em 1947, a construção de um aparelho capaz de produzir estes pulsos luminosos e de medir o espectro dos transientes gerados pela absorção do pulso. Já em 1949, fazendo uso deste instrumento inovador, eles estavam aplicando este novo método criado por eles, conhecido como *flash-photolysis* (ou fotólise por pulso, em português), para analisar espécies com tempo de vida curto, algo totalmente inédito na época [166,167]. Uma das consequências deste trabalho foi o Prêmio Nobel de

Química de 1967. Enquanto Norrish se concentrava mais em sistemas fotoquímicos em fase gasosa, a atenção de Porter foi migrando para sistemas em fase condensada. Ambos deram imensas contribuições para o desenvolvimento das primeiras técnicas de análise fotoquímica com alta resolução temporal.

Graças ao ganho de resolução temporal, na época ainda na escala de milissegundos e microssegundos, passou a ser possível investigar espectroscopicamente as propriedades de estados eletronicamente excitados, em particular o estado triplete excitado de certas moléculas orgânicas aromáticas. Investigações desta natureza se iniciaram pelo estado excitado triplete, exatamente pelo fato de seu tempo de vida ser maior do que o do estado excitado singlete. Em 1952, oito anos após Lewis e Kasha terem identificado o estado  $T_1$  como sendo o responsável pela fosforescência, Porter já estava investigando absorções triplete-triplete em solução, fazendo uso da fotólise por pulso na escala de microssegundos. Os primeiros experimentos foram feitos com soluções de antraceno em clorofórmio e hexano, mas nenhum triplete foi observado até que se degasasse a solução. Somente após remover o  $O_2$  do meio foi possível “enxergar” o estado excitado triplete do antraceno, usando pulsos de 25 ms, e observar um tempo de vida para esta espécie por volta de 200 ms. Ao se diminuir as concentrações de oxigênio molecular na solução (que é um supressor do estado triplete excitado), era possível observar as transições  $T_1-T_n$  e os tempos de vida de diversas substâncias na escala de centenas de microssegundos [167]. A fotólise por pulso (também chamada de fotólise por pulso convencional, pois usava uma lâmpada pulsada) foi um tremendo avanço técnico para a Ciência, principalmente para a Fotoquímica, pois ela deu aos cientistas, pela primeira vez, “olhos” que enxergam em escalas de tempo antes inacessíveis, abrindo portas para diversos avanços na Química, na Física e na Biologia.

Outro fotoquímico muito importante do século XX foi o físico-químico alemão Theodor Förster (1910-1974). Ele é o responsável por uma das grandes teorias de transferência de energia no estado excitado, conhecida como *FRET* (*Förster Resonance Energy Transfer*), que é a base para entender diversos fenômenos fotofísicos importantes, como o mecanismo de funcionamento das fases iniciais da fotossíntese, quando ocorre a migração dos éxcitons dentro dos complexos proteicos “antena” (*Light Harvesting Complexes*) até os centros de reação. Förster também foi um dos primeiros cientistas a observar a transferência de próton no estado excitado, que hoje é descrita pelo “ciclo de Förster”. Outro marco deste cientista alemão foi ter descoberto, em 1954, a existência dos excímeros, que são dímeros no estado excitado. Theodor Förster contribuiu imensamente

para o desenvolvimento da Fotoquímica moderna e tem seu sobrenome em diversos fenômenos, como uma forma de homenagem de seus pares ao seu trabalho científico. Ele também é reconhecido por seus alunos como tendo sido um excelente professor, além de ter escrito um importante livro de Fotoquímica sobre a fluorescência de compostos orgânicos (*Die Fluoreszenz organischer Verbindungen*) [59,168,169]. Algo mais obscuro e menos lembrado na literatura científica sobre Theodor Förster é a sua filiação ao Partido Nazista em 1933, mesmo ano em que terminou seu doutorado [170]. Tal fato é um lembrete de que cientistas são seres humanos, e que podem abraçar até mesmo o que existe de pior na Humanidade. Não deveria existir espaço na Ciência para celebrar “grandes heróis” nazistas, ou qualquer um que opte por se aliar a regimes de genocídio, guerra e destruição. O objetivo de trabalho do cientista, de compreender a Natureza, deve ser para promover o bem estar de todos os que habitam este planeta e não promover ou se unir àqueles que desejam o extermínio. É obrigação de quem conta a História lembrar e não deixar esquecer, não se deve tentar apagar os fatos, algo que os cientistas europeus que escreveram a biografia de Förster parecem não ter se importado tanto assim, talvez para não manchar a imagem do herói. Que os fotoquímicos do futuro não se esqueçam.

George Simms Hammond (1921-2005) e Nicholas J. Turro (1938-2012) são dois cientistas estadunidenses que também merecem uma menção nesta história. Hammond é um dos grandes e mais famosos químicos de todos os tempos, ele é lembrado na Química pelo seu “postulado de Hammond”, que trata sobre a geometria dos estados de transição em reações químicas, mas ele também deu imensas contribuições à Fotoquímica, e seu nome está diretamente ligado à História da Fotoquímica no Brasil [171]. Hammond foi o orientador de Turro em seu doutorado no Caltech, entre os anos de 1960 e 1963. Apesar de ter trabalhado em muitas áreas da Química por cinco décadas e ter publicado quase mil artigos científicos, Turro é mais conhecido pelo seu trabalho com Fotoquímica. Seus livros “*Molecular Photochemistry*” e “*Modern Molecular Photochemistry*”, publicados em 1965 e 1978 respectivamente, foram considerados como a “Bíblia da Fotoquímica” por muitos da área, ajudando a formar gerações de fotoquímicos no mundo inteiro [172]. Mais tarde, em 2010, seu livro foi atualizado e foi publicada uma versão mais atual, “*Modern Molecular Photochemistry of Organic Molecules*”, com a coautoria de outros dois grandes fotoquímicos: Vaidhyanathan Ramamurthy e Juan Cesar Scaiano.

Scaiano (ou Tito, como ele também é conhecido) é um químico argentino, nascido em 1945 em Buenos Aires, que reside no Canadá desde 1979. Por ser um dos cientistas que possui uma forte relação com a História da Fotoquímica no Brasil, ele também merece



um espaço para menção neste trabalho. Tito é um grande fotoquímico, professor da Universidade de Ottawa, desde 1982, e fundador da empresa “LuzChem”, especializada no design e na fabricação de instrumentos usados em laboratórios de Fotoquímica. Ele já publicou mais de 750 artigos, colaborou com centenas de pesquisadores do mundo todo e contribuiu para a formação de uma geração de novos fotoquímicos. Scaiano é um personagem importante da Fotoquímica contemporânea e os impactos de seu trabalho já são sentidos pela comunidade científica, como o fato dele ter contribuído para aprimorar a técnica de fotólise por pulso de laser, criada em 1966 por Lars Lindqvist na França (*laser flash photolysis*, técnica análoga à fotólise por pulso convencional, mas mais avançada pois fazia uso da tecnologia *laser* criada no começo da década de 60, o que permitiu expandir a resolução temporal dos equipamentos), que é muito importante para poder realizar estudos mecanísticos de intermediários de reação, estudar estados excitados, radicais e birradicais [173,174]. Outro fator, subjetivo, mas importante, é sobre a representatividade de ter um grande e renomado pesquisador latino-americano, nascido e formado na América do Sul, como um dos grandes nomes da Ciência atual. Pesquisadores como o Tito transmitem uma mensagem de que pessoas de países fora do eixo América do Norte/Europa são capazes de produzir ciência de qualidade.

O Brasil é um país imenso, de dimensões continentais, seria um tremendo desafio tentar analisar a História de qualquer área aqui, quem dirá na América Latina inteira. Por isso, assim como foram feitos recortes na História da Fotoquímica no mundo, recortes foram feitos no Brasil. Embora muitos eventos tenham ocorrido por vezes concomitantemente, escolheu-se, para fins de maior organização, destacar o Brasil do resto dos países na narrativa. Nesta parte do trabalho será esboçada apenas uma pequena fração do todo, com um enfoque maior na História da Fotoquímica no Rio de Janeiro.

Os professores Miguel Guillermo Neumann, do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), e Frank Herbert Quina, do Instituto de Química da USP, publicaram em 2002 um artigo tratando sobre a Fotoquímica no Brasil, abordando o tema sob uma visão histórica. Neste artigo, os autores relatam brevemente sobre o uso de corantes naturais por povos nativos, diversos fenômenos luminescentes observados por exploradores e cientistas europeus e, até mesmo, reações de escurecimento de sais de prata e de ouro provocado pela luz, estudadas por um francês situado no Brasil, tudo isso entre os séculos XVI e XIX [175]. Apesar de entendermos atualmente que há muita Fotoquímica por trás destes assuntos, não era ainda a ciência Fotoquímica ocorrendo de fato nestas terras. Neumann e Quina afirmam também que não

existem referências explícitas, na História da Química no Brasil, à existência de pesquisas em Fotoquímica ocorrendo antes de 1970. Linhas de pesquisa formais nesta área surgiram formalmente no país somente a partir do Programa de Cooperação Internacional entre o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Brasil, e a National Academy of Sciences (NAS), dos Estados Unidos, que escolheu a Fotoquímica como uma das áreas a ser apoiada. O Programa CNPq-NAS funcionou entre 1969 e 1977 e criou laboratórios de Fotoquímica em São Paulo e no Rio de Janeiro, através das colaborações entre o professor George S. Hammond, do Caltech, e os professores Vicente G. Toscano, da USP, e Warner Bruce Kover, da UFRJ [175].

O Programa CNPq-NAS trouxe jovens doutores estadunidenses para o Brasil, para auxiliarem na tarefa de montar os laboratórios e iniciarem a formação de recursos humanos especializados, através do desenvolvimento de atividades de ensino e na orientação de alunos de graduação e pós-graduação. Richard G. Weiss e Frank H. Quina foram para a USP e David Mog e David Ernest Nicodem vieram para a UFRJ. Ambos os laboratórios de Fotoquímica permanecem ativos, formando e disseminando a área desde a década de 70. Eventualmente começaram a emergir novos núcleos independentes de pesquisa em Fotoquímica em universidades pelo sudeste brasileiro, contribuindo para a formação de uma comunidade fotoquímica inicial no país. Progressivamente, entre os anos 1980 e 1990, foi aumentando a disponibilidade de equipamentos especializados para estudos fotoquímicos e fotofísicos. Em 1981 aconteceu o primeiro Encontro Informal Brasileiro de Fotoquímica e Fotobiologia (EIBhn), na cidade de Campinas, mais tarde ocorreram outros dois, um em São Paulo, em 1983, e outro no Rio de Janeiro, em 1986. Em 1982 foi realizado em Santiago, no Chile, o primeiro Encontro Latino-Americano de Fotoquímica e Fotobiologia (ELAFOT), evento que integrou as comunidades fotoquímicas do Brasil, do Chile e da Argentina, e que levou à fusão do EIBhn com o ELAFOT em 1988, realizado na cidade de São Carlos. A partir de 1992 passou a existir a Divisão de Fotoquímica dentro da Sociedade Brasileira de Química (SBQ). E desde 1996, a Inter-American Photochemical Society (IAPS) reconhece a existência de uma grande massa crítica em Fotoquímica na América Latina, onde realiza, a cada 5 anos, a sua reunião anual [175].

Em 2017 o professor Neumann e a professora Carla Cristina Schmitt Cavalheiro, também do Instituto de Química de São Carlos da USP, publicaram um novo artigo de cunho histórico sobre a Fotoquímica no Brasil. Neste artigo eles retomam alguns acontecimentos citados no artigo de Neumann e Quina, de 2002, e completam com

reflexões sobre os 15 anos que se passaram. Eles pontuam que, desde o seu surgimento, a Fotoquímica brasileira é muito marcante pelo seu caráter interdisciplinar, reunindo pesquisadores de diversas áreas das Ciências Naturais. Eles também analisam o crescimento e a variedade de linhas de pesquisa ligadas à área, o crescimento do número de publicações, nacionais e internacionais, nas diversas especialidades de Fotoquímica, o crescimento dos grupos tradicionais no Rio de Janeiro e em São Paulo, bem como o surgimento de novos grupos em outras regiões brasileiras. Os autores argumentam que a Fotoquímica brasileira se mantém competitiva no cenário internacional e que conseguiu encontrar formas para se manter uma área específica em meio a tanta interdisciplinaridade e tantas aplicações, algo que era uma preocupação para Neumann e Quina em 2002. Os diversos grupos no Brasil vêm consolidando suas atividades de pesquisa básica e expandindo seu leque de interdisciplinaridade e de pesquisas aplicadas. A instrumentação dos laboratórios tem avançado, com equipamentos cada vez mais sofisticados disponíveis à comunidade fotoquímica nacional e cresce o corpo de pesquisadores de alto nível e com grande inserção internacional na área [176]. Assim, 50 anos após o Programa CNPq-NAS, pode-se dizer que a colaboração internacional entre o Brasil e os Estados Unidos foi bem sucedida em implementar e fazer crescer a Fotoquímica no Brasil.

No Rio de Janeiro, ao menos na UFRJ, as primeiras pesquisas realizadas em Fotoquímica que se tem registro antecedem o Programa CNPq-NAS. O primeiro registro é o de Anita Leocádia Benário Prestes, filha de Luís Carlos Prestes e Olga Benário Prestes. Anita nasceu em 1936 em Berlim, na Alemanha, e voltou para o Brasil ainda criança, em 1945. Em 1960 ela ingressou na UFRJ, para estudar Química Industrial na antiga Escola Nacional de Química, e se formou em 1964. Após a graduação, entre 1964 e 1966, Anita seguiu para um mestrado na Escola Nacional de Química e, sob orientação do professor Cláudio Costa Neto, desenvolveu seu trabalho “Comportamento fotoquímico das benzoínas e furoínas”. Por motivos políticos, já bem documentados na História recente do Brasil, Anita não seguiu carreira na Química, pois ela era perseguida política no país e teve de se exilar na antiga União Soviética. Quando voltou para o Brasil, após a anistia, ela seguiu para outro caminho acadêmico-profissional, realizou um doutorado em História, entre 1985 e 1989, na Universidade Federal Fluminense (UFF) e se tornou professora de História, em 1992, no Departamento de História da UFRJ [177,178]. Outro aluno do professor Costa Neto que também trabalhou com um assunto ligado à Fotoquímica foi Ricardo Bicca de Alencastro, atualmente professor emérito do Instituto de Química da UFRJ. Em seu mestrado, entre 1966 e 1969, o professor Bicca

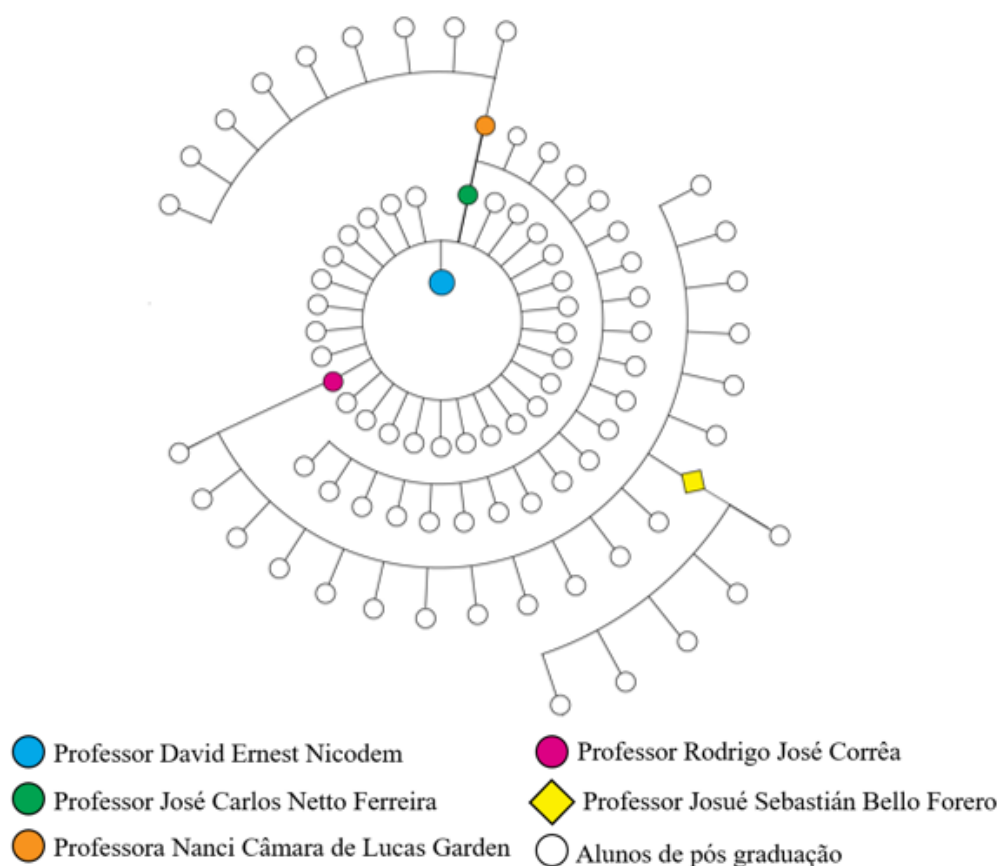
realizou um estudo sobre a “Oxidação Química e Fotoquímica de 4,4’-bis-(dimetilamino)-tiobenzofenona (Tioacetona de Michler)” [179].

Em 1970 veio para o Rio de Janeiro, através do Programa de Cooperação Internacional CNPq-NAS, o estadunidense, recém formado doutor, David Mog, para atuar junto ao professor Bruce Kover na criação do Laboratório de Fotoquímica do Instituto de Química da UFRJ e começar a formar os primeiros fotoquímicos na instituição. O professor Bruce Kover orientou, ao todo, 5 trabalhos de pós graduação que envolviam algo ligado a Fotoquímica, sendo dois deles durante o período do Programa CNPq-NAS (1969-1977) [180]. Já David Mog ficou no Brasil apenas por três anos e neste período ele orientou José Carlos Netto-Ferreira, Aurélio Baird Buarque Ferreira, João Augusto de Mello Gouveia Matos e Nilton Carnieri. Entretanto, em 1973 ele decidiu voltar para os Estados Unidos. Dos três alunos de Mog, apenas Nilton Carnieri concluiu seu mestrado sob sua orientação, em 20 de setembro de 1974, após Mog ter partido, com uma dissertação intitulada “Estudos sobre o mecanismo da hidroxilação dos derivados do 2-hidroxiázobenzeno aos respectivos 2.2’- dihidroxiázobenzenos” [181]. Aurélio não permaneceu no Brasil e não concluiu seu trabalho sob a supervisão de Mog, ele foi para o Reino Unido, em 1972, realizar seu doutorado em Química na University of Southampton. Após concluir seu doutorado, em 1977, ele continuou na mesma universidade por mais dois anos fazendo um pós-doutorado e em 1979 ele voltou para o Brasil, onde se tornou professor, em 1982, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) [182]. José Carlos e João Augusto permaneceram na UFRJ, mas tiveram de reiniciar seus mestrados com a chegada de um novo orientador, David Nicodem.

David Ernest Nicodem fez seu doutorado na Colorado State University System, nos Estados Unidos, de 1965 a 1969, sob a orientação do professor Frank R. Stermitz e defendeu sua tese “The alkaloids of Argemone Polyanthemus (Fedde) Ownbey, Argemone Corymbosa Subsp. Arenicola Ownb., and Argemone Sanguinea Greene and the Photoreductone of some alkyl aryl Ketones”, e um pós doutorado no Rensselaer Polytechnic Institute, de 1969 a 1972, em Nova Iorque. Selecionado por George Hammond para substituir David Mog no Rio de Janeiro, David Nicodem veio para a UFRJ em 1973, onde se tornou professor e responsável pelo Laboratório de Fotoquímica do IQ-UFRJ [183]. Quando chegou ao Brasil, a Química estava de mudança de um prédio na Praia Vermelha, na Urca, para o Centro de Tecnologia da UFRJ, na Ilha do Fundão. Seu primeiro aluno, tanto de mestrado, quanto de doutorado foi José Carlos Netto-Ferreira, que teve de abandonar seu projeto de mestrado anterior, realizado com Mog, e

recomeçar um novo com Nicodem. José Carlos concluiu o mestrado em abril de 1976, com a dissertação intitulada “Fotorredução de beta-fenilpropiofenona substituída”, e o doutorado em 1983, com a tese “Estudo mecanístico da fotorredução de beta-fenilpropiofenonas”. Em 1975 José Carlos já havia se tornado professor da UFRRJ, onde ficou até se aposentar, e hoje é professor emérito da mesma universidade [184]. O professor “Zé Carlos” é um dos grandes nomes da Fotoquímica brasileira, ao longo de sua carreira ele já publicou mais de 100 artigos em periódicos científicos, orientou dezenas de alunos de graduação e de pós-graduação, atuou profissionalmente em diversas instituições renomadas dentro e fora do Brasil (UFF, UFRRJ, UFBA, USP, INMETRO, Universidade Técnica de Lisboa, Universitat Politècnica de València e University of Ottawa) e é um cientista muito bem relacionado nacional e internacionalmente, tendo inclusive uma colaboração de longa data com Tito Scaiano.

A partir do professor David Ernest Nicodem, a árvore genealógica da Fotoquímica no Rio de Janeiro nasceu, cresceu e prospera há quase 50 anos. Alguns de seus alunos, como o professor José Carlos Netto-Ferreira, se tornaram professores universitários, que continuaram a propagar o ensino e a pesquisa nesta área da Ciência, assim surgiram mais alunos e novos ramos na árvore. Com base nas informações disponíveis na Plataforma de Currículos Lattes, foi criada uma representação desta genealogia do Laboratório de Fotoquímica, que pode ser visto na Figura 12, inspirada nos diagramas filogenéticos da Biologia (também conhecidos como “Árvore da Vida”). Nesta “árvore da Fotoquímica” o professor David Nicodem, representado pela bolinha de cor azul, ocupa o centro do diagrama, ele é o equivalente ao “*Last Universal Common Ancestor*” (LUCA) da Árvore da Vida. A partir do professor Nicodem, surgem os seus alunos, representados por bolinhas brancas. Neste diagrama só foi possível representar os alunos de mestrado e doutorado, ficando de fora os alunos de iniciação científica e os orientados em monografia de final de curso de graduação. As outras bolinhas coloridas representam outros professores que deram continuidade à linhagem do Laboratório de Fotoquímica, são eles os professores José Carlos Netto-Ferreira, Nanci Câmara de Lucas Garden, Rodrigo José Corrêa e Josué Sebastián Bello Forero (Sebastián não está representado como uma bolinha ligada ao ramo do Rodrigo, mas sim como um quadradinho, pois ele fez seu mestrado e doutorado sob a orientação de outros professores do IQ-UFRJ, sem relação com o Laboratório de Fotoquímica, mas fez seu pós-doutorado sob a supervisão do professor Rodrigo e atualmente é um dos professores responsáveis pelo Laboratório de Fotoquímica do IQ-UFRJ, por isso se encontra conectado à árvore).



**Figura 12.** Árvore genealógica do Laboratório de Fotoquímica do Instituto de Química da UFRJ (1970-2020).

A professora Nanci Câmara de Lucas Garden foi a primeira aluna de mestrado e de doutorado do professor José Carlos. Ela fez seu mestrado na UFRRJ, entre 1986 e 1991, e o título de sua dissertação foi “Fotoquímica de alfa-Fenoxiacetofenona em Solventes Orgânicos e Complexada com Ciclodextrinas”. Realizou doutorado na UFRJ, entre 1991 e 1995, também sob a supervisão professor José Carlos, com a tese intitulada “Estudo por Fotólise com Pulso de Laser de Cetenas Geradas via Fotorrearranjo de Wolff. Reatividade Frente a Espécies Nucleofílicas”. Durante esse período realizou doutorado sanduíche de 2 anos e meio na University of Ottawa, onde ela produziu toda a parte experimental de seu trabalho sob a supervisão do Tito Scaiano. Após defender seu doutorado, realizou um pós-doutorado na UFRRJ de 1995 a 1997, mas utilizava a infraestrutura do Laboratório de Espectroscopia Resolvida no Tempo, no IQ-UFRJ. Nanci foi professora substituta na UFRRJ entre 1995 e 1996, passou para o concurso de professora adjunta na UFF, em 1998, e chegou a assumir o cargo. Em 1999 ela passou no concurso de professora, setorizado em Fotoquímica, da UFRJ. Devido a infraestrutura

necessária para poder trabalhar nas suas linhas de pesquisa estar toda no IQ-UFRJ, ela optou por pedir exoneração da UFF e assumiu o cargo de professora na UFRJ, onde ela se encontra desde então, dando aulas, orientando seus alunos e realizando suas pesquisas [185]. Vale ressaltar que a Nanci é uma das poucas mulheres pesquisadoras na área de Fotoquímica em todo o estado do Rio de Janeiro. Ainda existe uma grande assimetria de gênero nesta área da Ciência, assim como em muitas outras, e isso é um problema que deve ser levado em consideração e encarado com responsabilidade, para que no futuro existam mais mulheres fotoquímicas em nosso estado.

O professor Rodrigo José Corrêa concluiu seu mestrado com o professor David Nicodem em 1997, o título de sua dissertação foi “Fotodegradação e formação de oxigênio singlete por petróleo e algumas de suas frações”. Rodrigo não realizou seu doutorado no Laboratório de Fotoquímica, ele o fez sob a supervisão do professor Claudio José de Araujo Mota. Em 2002 ele passou no concurso para professor da UFRJ e retornou ao Laboratório de Fotoquímica, onde continua até os dias atuais [186].

O professor Josué Sebastián Bello Forero é colombiano e veio para o Brasil fazer sua pós-graduação, ele fez seu mestrado e doutorado no IQ-UFRJ, sob a orientação dos professores Joel Jones Junior e Flavia Martins da Silva. Foi somente em 2014 no seu pós-doutorado, sob a supervisão do professor Rodrigo Corrêa, que Sebastián teve contato formal com o Laboratório de Fotoquímica. Ele passou para o concurso de professor do IQ-UFRJ em 2015 e ingressou como o mais novo professor responsável pela Fotoquímica na instituição [187].

O legado deixado pelo professor David Nicodem foi tremendo, não só no Rio de Janeiro, mas no Brasil inteiro. Em 2020, é possível rastrear diversos ex-alunos do Laboratório de Fotoquímica da UFRJ em diversas instituições de ensino (básico e superior) e de pesquisa (públicas ou privadas) em várias partes do país. David acredita até os dias atuais que mais importante do que formar fotoquímicos, ele estava formando cientistas, formando cidadãos, pessoas críticas, conscientes e responsáveis, a Fotoquímica era o caminho pelo qual ele atingia este objetivo. Ele se aposentou em 2011 e uma forma singela de homenageá-lo foi batizar o laboratório com o seu nome. Desde então, o lugar onde ele passou 38 anos de sua vida, formando uma parcela da próxima geração de cientistas brasileiros, passou a ser chamado “Laboratório de Fotoquímica David Ernest Nicodem”.

David Nicodem não foi o único cientista estadunidense a ocupar o cargo de professor no Instituto de Química da UFRJ. Por quase 30 anos, de 1976 a 2005, o

Departamento de Química Inorgânica (DQI) do IQ-UFRJ também teve um fotoquímico, o professor Ira Mark Brinn. Ele fez seu doutorado em Química na University of Pittsburgh, nos Estados Unidos, e sua tese, intitulada “Electronic Structures and Acidities in Excited States of Substituted Naphthalenes”, foi defendida em 1968. Ele veio para o Brasil em 1970 e foi professor da Universidade Federal de Pernambuco até 1976, neste ano ele se mudou para o Rio de Janeiro e se tornou professor da UFRJ. O professor Ira coordenou o Laboratório de Espectroscopia Resolvida no Tempo (LERT), no DQI do IQ-UFRJ, e colaborou com os professores David Nicodem, José Carlos e Nanci, não só em trabalhos de pesquisa, mas também em projetos de aquisição de equipamentos sofisticados para instrumentação experimental fotoquímica. Quando Ira se aposentou, em 2005, a infraestrutura do LERT foi transferida para o Laboratório de Fotoquímica, no Departamento de Química Orgânica do IQ-UFRJ, onde permanece desde então. A grande infraestrutura espectroscópica é para o Laboratório de Fotoquímica o que a mitocôndria é para a célula eucarionte, os equipamentos do Laboratório de Fotoquímica são a base de todas as pesquisas realizadas pelo grupo e pelos colaboradores, permitem a realização de todos os trabalhos, são a alma do Laboratório de Fotoquímica David Ernest Nicodem. Muitos equipamentos do LERT foram adquiridos graças ao Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PADCT) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), coordenados pelos professores David, Ira, José Carlos e Nanci, diversos outros instrumentos foram adquiridos graças aos projetos de pesquisa em colaboração com empresas privadas, como Light, TAESA e Petrobrás, coordenados pelo professor Rodrigo Corrêa.

A Fotoquímica no Rio de Janeiro não se resume apenas ao Laboratório de Fotoquímica David Ernest Nicodem. Com o passar dos anos, outros núcleos surgiram na UFRRJ, na UFF e até mesmo dentro do IQ-UFRJ. Existem outros laboratórios dedicados a este ramo da Ciência no Rio de Janeiro, cada um com histórias únicas. Os professores José Carlos, Aurélio e Darí Cesarin Sobrinho na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; os professores Fabio da Silva Miranda e Pedro Netto Batalha na Universidade Federal Fluminense; e além da Nanci, do Rodrigo e do Sebastián, os professores Simon John Garden, Emerson Schwingel Ribeiro e Thiago Messias Cardozo na Universidade Federal do Rio de Janeiro, sem contar todos as centenas de alunos e ex-alunos destas pessoas, todos fazem parte da comunidade fotoquímica no estado do Rio de Janeiro. A Fotoquímica cresceu muito no Rio, certamente cresceu muito em São Paulo e no Brasil



inteiro, e crescerá mais. Muitos anos repletos de luz estão por vir, não apenas na América do Sul, mas no mundo.

A História da Fotoquímica tem raízes tão profundas quanto a Óptica de Alhazen, milênios atrás, mas ela ainda é apenas um bebê quando comparada com outras Ciências da Natureza mais antigas. Da difração da luz branca por um prisma à reação fotoquímica da santonina, dos fótons à fotólise por pulso de laser, a humanidade desvendou diversos mistérios da Natureza e solucionou uma imensa quantidade de problemas, mas ainda existe um mar de escuridão pela frente, ainda não sabemos tudo, não estamos nem perto disso, existem milhares de mistérios e talvez milhões de problemas pela frente, talvez o maior de todos, no futuro próximo, seja o das mudanças climáticas, que já começaram e que terão um efeito devastador para todas as formas de Vida na Terra. Todos correm sérios perigos devido ao uso excessivo e irresponsável de combustíveis fósseis, ninguém está a salvo, nem mesmo o *Homo Sapiens*, que acredita, no auge de sua arrogância, ser intocável e ter atingido o patamar de “Todo Poderoso” enquanto espécie. Talvez, como Ciamician profetizou em 1912, a solução venha da luz. Os fotoquímicos terão um papel central nesta batalha do século XXI, nós contra o gigantesco problema que criamos, mas isso só será possível se houver colaboração entre todos cientistas e os demais setores da sociedade. A Ciência não é mais como ela já foi, ela mudou e continuará mudando, quer a gente goste ou não. A História está apenas começando.

#### 6.2. Avaliação do domínio de fundamentos de Fotoquímica e Espectroscopia por alunos da Licenciatura em Química do IQ-UFRJ

Conforme previsto na Lei de Diretrizes de Bases da Educação Nacional (LDB de 1996), a formação de professores da Educação Básica se dá em cursos de Ensino Superior de Pedagogia e nas Licenciaturas, assim químicos que desejarem atuar como professores de Química no Ensino Básico devem obter o grau de licenciado. A Universidade Federal do Rio de Janeiro oferece diversos cursos de Licenciatura, dentre eles a Licenciatura em Química, situada no Instituto de Química. Alunos deste curso cumprem, ao longo de sua formação, créditos obrigatórios de diversas unidades, do Instituto de Matemática, Instituto de Física, Instituto de Geociências, Faculdade de Letras, Faculdade de Educação e do Instituto de Química, obtendo uma formação ampla [188].

Com a Reforma da Educação Básica no Brasil, entrou em vigor a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), documento normativo que serve de referência para a

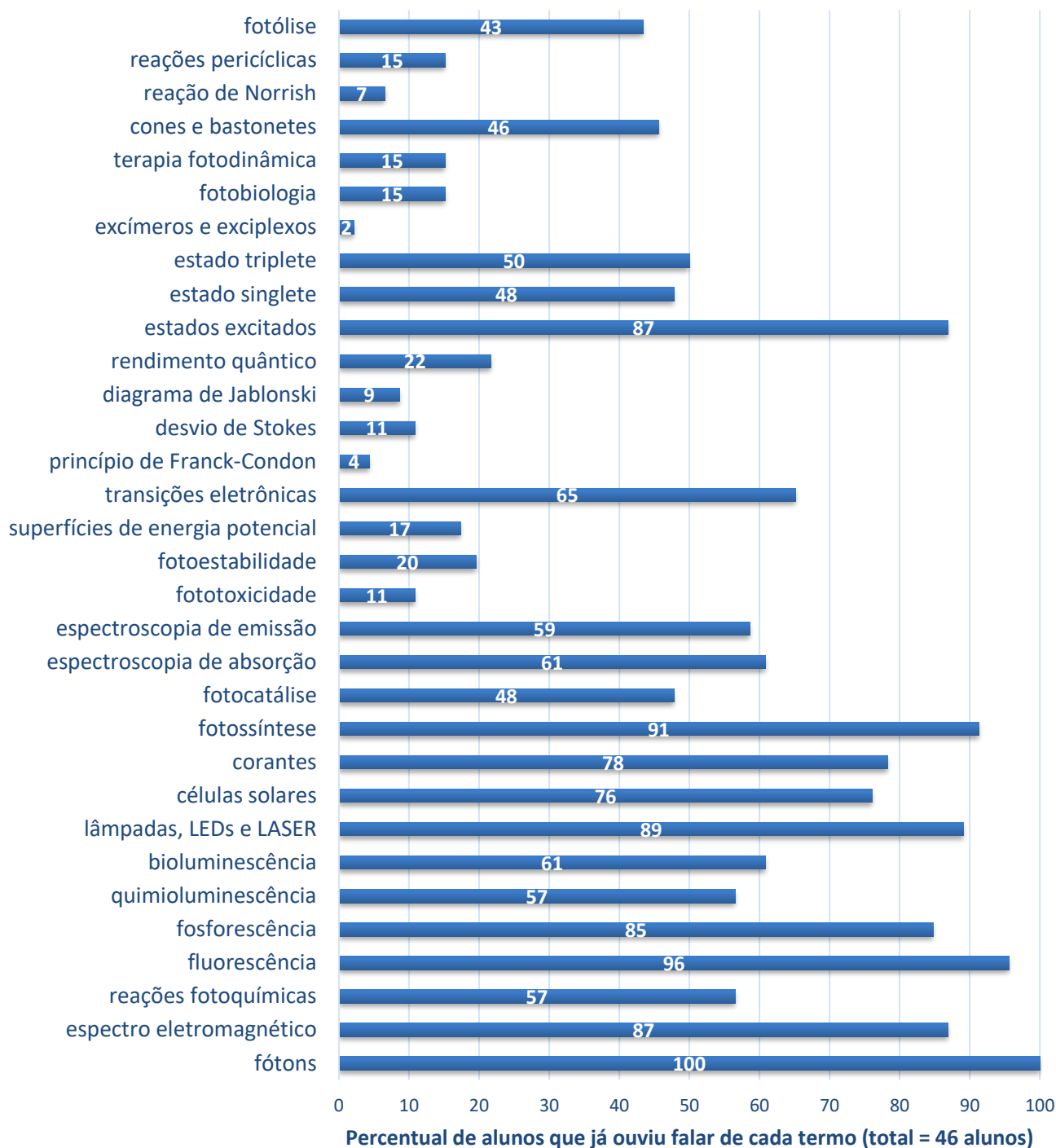
elaboração dos currículos escolares de todas as redes de ensino, públicas e privadas, e de todas as etapas da Educação Básica do país. A BNCC para o Ensino Médio se organiza de forma contínua ao que foi proposto para as etapas anteriores de ensino e se estrutura em quatro áreas: Linguagens e suas Tecnologias, Matemática e suas Tecnologias, Ciências da Natureza e suas Tecnologias e Ciências Humanas e Sociais Aplicadas. Dentro da parte dedicada às Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Ensino Médio, a BNCC propõe um aprofundamento nas temáticas *Matéria e Energia*, *Vida e Evolução* e *Terra e Universo*. Em *Matéria e Energia* existem competências específicas exigidas pela Base que se relacionam com as interações entre a luz e a matéria, abrindo espaço na escola para discussões mais profundas sobre as radiações eletromagnéticas na Química e suas aplicações, que passam por Fotoquímica e Espectroscopia. Assim, foi realizada uma pesquisa com 46 alunos voluntários da Licenciatura em Química da UFRJ, com o objetivo de avaliar qualitativamente o seu domínio de conceitos básicos de Fotoquímica. O instrumento desta avaliação foi um questionário anônimo com 17 questões, 12 objetivas e 5 discursivas. O questionário elaborado se encontra no Apêndice deste trabalho.

Dos 46 estudantes avaliados, 42 alunos já ouviram falar sobre Fotoquímica alguma vez na vida, conforme pode se observar na Tabela 2 (elaborada a partir das respostas às questões 1 e 2). De acordo com a grade curricular do curso de Licenciatura em Química da UFRJ, o curso se divide em 10 períodos, podendo ser integralizado em até 15, assim, nesta pesquisa, alunos até o 5º período serão considerados do “Grupo 1” e alunos do 6º período em diante serão considerados do “Grupo 2”. Existe um cronograma sugerido pelo Instituto de Química, mas todos os alunos a partir do 2º período têm liberdade na escolha de como montar suas grades semestrais, por isso não necessariamente dois alunos no mesmo semestre terão cursado, ou estarão cursando, as mesmas disciplinas, o que certamente pode ter influência nas respostas deste questionário.

**Tabela 2.** Períodos dos 46 alunos participantes da pesquisa e somatório de quantos já ouviram falar sobre Fotoquímica.

<i>Período</i>	<i>Número de participantes</i>	<i>Nº de participantes que já ouviram falar de Fotoquímica</i>	<i>Nº de participantes que não ouviram falar de Fotoquímica</i>
<i>1</i>	12	10	2
<i>2</i>	3	2	1
<i>3</i>	1	1	0
<i>4</i>	3	3	0
<i>5</i>	4	4	0
<i>6</i>	5	5	0
<i>7</i>	1	1	0
<i>8</i>	4	3	1
<i>9</i>	4	4	0
<i>10</i>	1	1	0
<i>11</i>	2	2	0
<i>12</i>	3	3	0
<i>13</i>	1	1	0
<i>14</i>	2	2	0
<i>Total:</i>	46	42	4

Foi solicitado aos alunos que eles assinalassem os itens, com termos relacionados a Fotoquímica, que eles já ouviram falar (questão 3). Assim foi possível quantificar quais conceitos são mais e quais são menos familiares e, a partir disso, foi construído o gráfico a seguir contendo essas informações (Figura 13).



**Figura 13.** Percentual de alunos que já ouviram falar sobre determinados termos associados a Fotoquímica.

Todos os alunos marcaram que já ouviram falar sobre os fótons, mas este foi o único conceito 100% assinalado, o que é algo inusitado, pois esperava-se um resultado semelhante para outros termos como “espectro eletromagnético”, “transições eletrônicas”, “corantes”, “lâmpadas” ou até mesmo “fotossíntese”. Apesar disso, diversos

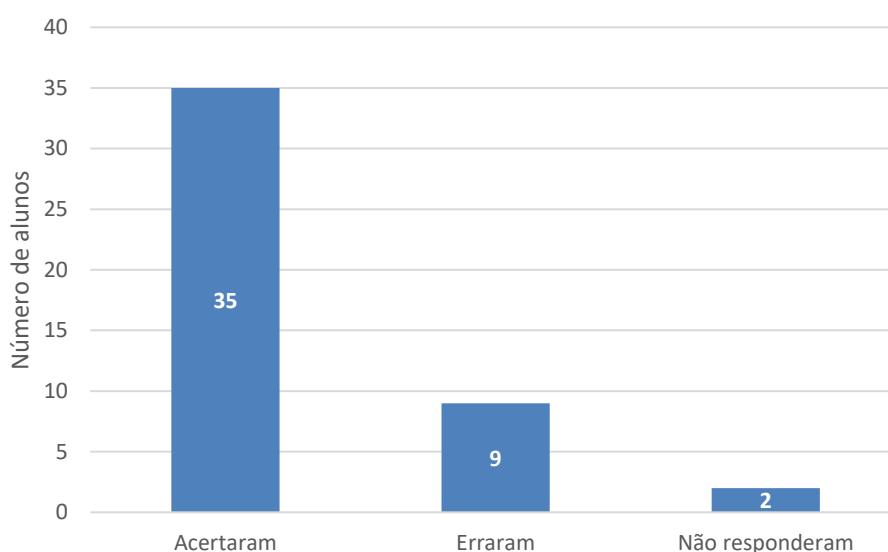
termos atingiram 50% ou mais marcações. 15 termos obtiveram menos do que 50% alunos assinalando-os, o que já não é tão surpreendente, uma vez que estes que obtiveram um número menor são um pouco mais específicos e restritos a quem teve um contato maior com a Fotoquímica, seja através de uma disciplina ou uma iniciação científica que aborde sobre o assunto. A única exceção, um tanto quanto surpreendente, são as “superfícies de energia potencial”, que obtiveram apenas 17% dos alunos marcando que já ouviram falar sobre elas. Esperava-se um número maior de marcações neste termo por parte de alunos do Grupo 2 (aumentando o percentual para algo maior ou igual 50% dos alunos), que provavelmente já passaram por alguma disciplina que aborde este conceito. É um resultado estranho porque elas não se restringem à Fotoquímica, é comum estudá-las em diversas outras disciplinas do curso de Química, como Química Quântica, Termodinâmica, Química Orgânica e até mesmo em Química Inorgânica.

Em seguida, ao serem questionados sobre se acreditavam que a Fotoquímica está presente de alguma maneira em seu cotidiano (questão 4), 3 alunos deixaram o espaço destinado às respostas em branco e uma pessoa respondeu que não sabia. Muitos alunos deram respostas afirmativas e exemplos como lâmpadas, LEDs, fotossíntese, visão, células solares, corantes e alguns citaram até fenômenos luminescentes como a fluorescência, fosforescência e bioluminescência, outros citaram fenômenos ligados a saúde como a síntese fotoquímica da vitamina D, a regularização do ciclo circadiano pela luz e os efeitos provocados pela luz na pele (como bronzeamento e câncer de pele). Quase todos sabiam citar ao menos um exemplo cotidiano, por isso as diversas respostas evidenciaram que a Fotoquímica não é um assunto completamente estranho à maior parte dos alunos. Todas as respostas se encontram na Tabela A 1, no apêndice.

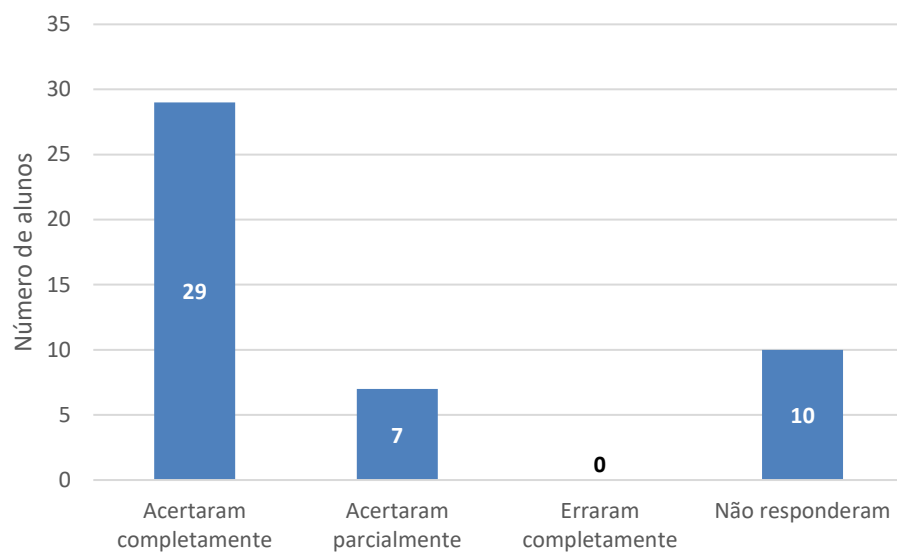
Quando perguntados sobre fenômenos que podem acontecer com uma molécula no estado excitado (questão 5), apenas 12 (26% do total) responderam que não sabiam ou não responderam, os demais deram diversas respostas, a maioria envolvendo emissão de luz. Houve algumas respostas erradas, mas 11% dos alunos foram além de responder simplesmente algo ligado à emissão luminosa e deram respostas envolvendo reações fotoquímicas, demonstrando conhecer que há transformações químicas além do estado fundamental, além das reações térmicas. Todas as respostas se encontram na Tabela A 2, no apêndice.

A segunda página do questionário, da sexta à décima pergunta, era basicamente toda objetiva. O objetivo destas perguntas era sondar o domínio básico dos alunos com algumas questões ligadas às interações da luz com a matéria, como o uso do círculo

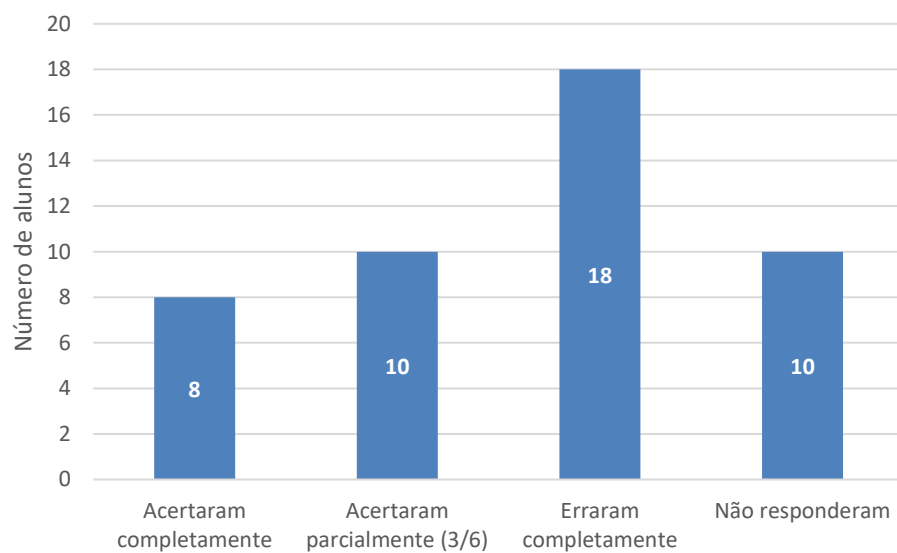
cromático e da informação de absorção luminosa na região do visível para prever cores de objetos (questões 6 e 7), correlacionar diferentes regiões do espectro eletromagnético com fenômenos provocados por cada tipo de radiação na matéria (questão 8), reconhecer as células fotorreceptoras (cones e bastonetes) como as estruturas responsáveis pela absorção de luz no sentido da visão (questão 9) e correlacionar os estados fundamental singlete, excitado singlete e excitado triplete aos seus respectivos diagramas, com a orientação correta do spin eletrônico (questão 10). As respostas para cada pergunta foram organizadas em gráficos e se encontram nas Figuras 14 – 18.



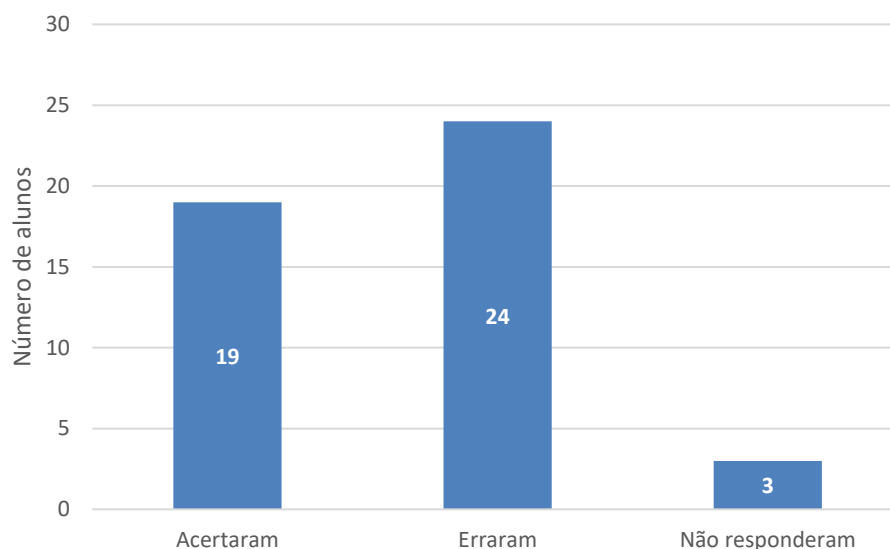
**Figura 14.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 6 do questionário.



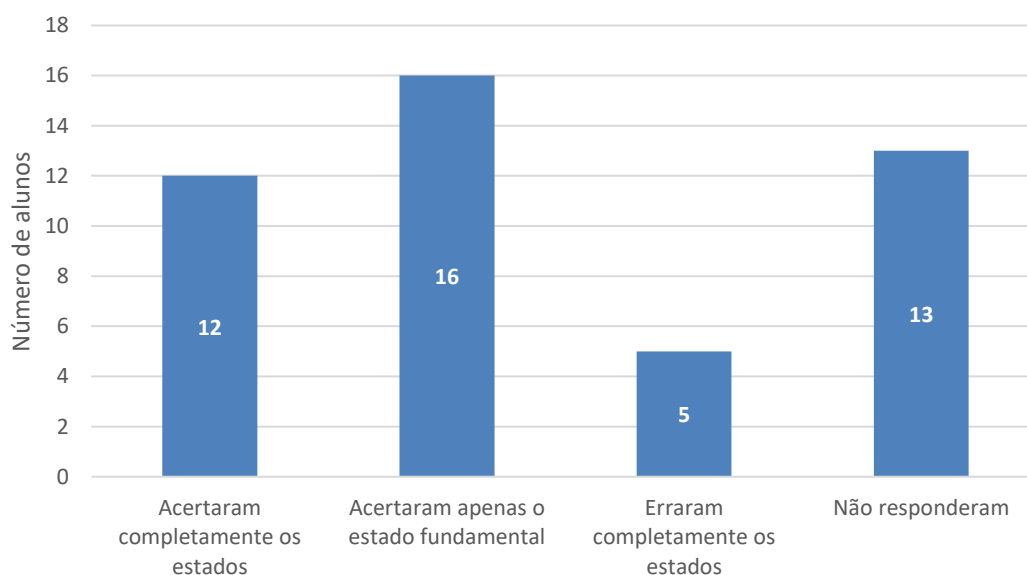
**Figura 15.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 7 do questionário.



**Figura 16.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 8 do questionário.



**Figura 17.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 9 do questionário.



**Figura 18.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 10 do questionário.

A partir das respostas dos alunos às questões 6 e 7, é possível observar, nas Figuras 14 e 15, que a maioria consegue, sabendo a luz que foi absorvida e fazendo uso do círculo cromático, prever corretamente as cores de objetos. Já a Figura 16 evidencia que a maioria dos alunos não consegue correlacionar corretamente os fenômenos físico-químicos com as diferentes regiões do espectro eletromagnético que os provocam. Apenas 19 alunos, dos 46, sabiam que são os cones e os bastonetes os responsáveis pela visão (Figura 17) e apenas 12 alunos conseguiram correlacionar corretamente todos os estados ( $S_0$ ,  $S_1$  e  $T_1$ )



aos diagramas HOMO-LUMO, como pode se observar na Figura 18. Entretanto, nesta questão, 16 alunos assinalaram corretamente que o estado fundamental é aquele representado na letra “b”, onde os elétrons se encontram emparelhados no HOMO, errando apenas os estados excitados.

As questões 11, 12 e 13 eram discursivas, permitindo que os voluntários dissertassem sobre três assuntos: fenômenos luminescentes, dispositivos que emitem luz e a relação entre a saúde e a luz, respectivamente. A questão 11 pedia a definição de fluorescência, fosforescência e a diferença entre os dois fenômenos; a questão 12 perguntava a diferença entre uma lâmpada incandescente, uma lâmpada fluorescente, um LED e um LASER; já na questão 13 os alunos deveriam explicar de que forma a radiação ultravioleta, emitida pelo Sol, pode provocar danos ao DNA.

Ao todo, na 11ª questão, 27 alunos (59% do total) deixaram o espaço para as respostas em branco e 2 responderam que não sabiam explicar, que apenas ouviram falar sobre os fenômenos. Dentre os 17 alunos que responderam, apenas 5 eram do Grupo 1 (22% do Grupo 1) e 12 eram do Grupo 2 (52% do Grupo 2). As respostas podem ser vistas no apêndice do trabalho, na Tabela A 3. Alunos do 1º período tiveram mais dificuldade de responder esta pergunta, obteve-se de alguns deles respostas associando, erroneamente, a fluorescência como uma consequência à presença de flúor e a fosforescência à presença de fósforo em um material. Alunos um pouco mais avançados no curso foram capazes de dar respostas melhores, relacionando corretamente os fenômenos ao tempo de duração da emissão, mas ainda assim foram poucos aqueles que deram explicações mais aprofundadas, baseadas em transições eletrônicas e estados, algo que se esperaria de mais alunos do Grupo 2, uma vez que alunos do final do curso já deveriam ter cursado Química Quântica.

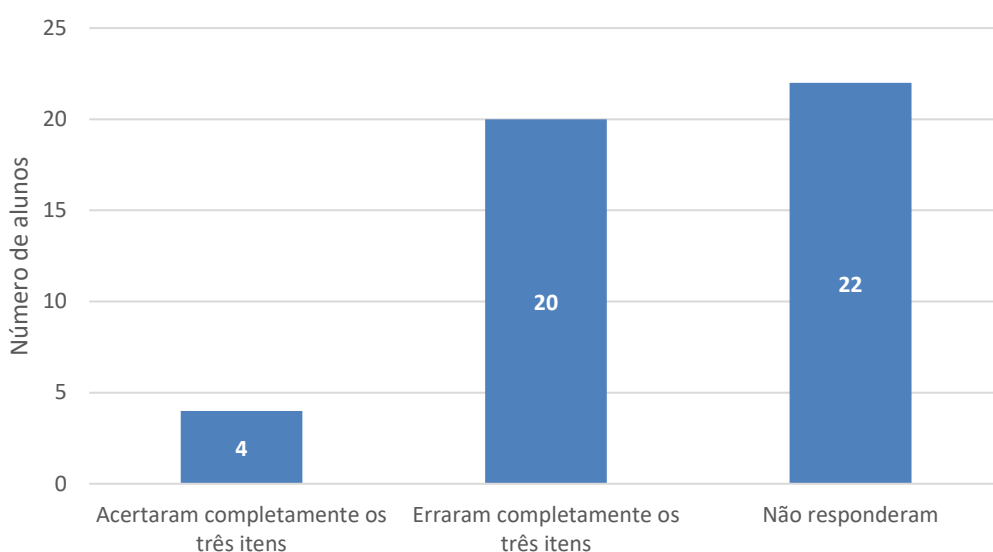
Apenas 14 alunos (30% do total) responderam à questão 12 (28 deixaram em branco e 4 disseram que não sabiam). Dos que responderam, 5 eram do Grupo 1 (22% do Grupo 1) e 9 do Grupo 2 (39% do Grupo 2). As respostas se encontram na Tabela A 4. Novamente, obteve-se um número baixo de respostas em uma pergunta sem um grau elevado de dificuldade. Deveria ser mais generalizado o conhecimento básico sobre o funcionamento de dispositivos tão presentes na vida das pessoas como são as lâmpadas, LEDs e lasers. Esperava-se que os alunos soubessem o básico sobre o efeito Joule e a incandescência nas lâmpadas incandescentes, entendendo que estes dispositivos usam de um processo físico demasiadamente ineficiente em termos do seu consumo de energia elétrica; ou que eles compreendessem que o funcionamento de lâmpadas fluorescentes

envolve a emissão inicial de uma radiação eletromagnética de alta energia, através da descarga elétrica em um tubo contendo um gás (normalmente vapor de mercúrio), que é absorvida por um material no interior da lâmpada e provoca a sua fotoluminescência no espectro visível; ou ainda que soubessem que existem, hoje, dispositivos semicondutores optoeletrônicos, capazes de emitir luz visível através da aplicação de uma voltagem, e que estes “diodos emissores de luz” são muito mais eficientes energeticamente do que as lâmpadas; nem mesmo os lasers a maioria dos alunos foi capaz de dar uma resposta, apesar de aplicações para este dispositivo serem vastas no presente século: de canetas “laser pointer” e cirurgias oftalmológicas complexas à até mesmo laboratórios avançadíssimos cuja missão é a detecção de ondas gravitacionais, por meio da interferometria luminosa provocada por contrações no tecido do espaço-tempo, tudo isso graças à amplificação da luz por emissão estimulada de radiação.

Na 13ª questão, 23 alunos responderam (50% do total) (22 deixaram em branco e 1 respondeu que não sabia), sendo 8 do Grupo 1 (35% do Grupo 1) e 16 do Grupo 2 (70% do Grupo 2). Observou-se em todas as respostas (presentes na Tabela A 5) que os alunos foram capazes de reconhecer a região do espectro ultravioleta como sendo a responsável pelos danos biológicos provocados na pele pela luz solar, entretanto foram poucos os que deram explicações mais “químicas” sobre as transformações do DNA frente ao UV, como, por exemplo, um aluno que mencionou as reações de fotocicloadição, um dos processos que pode ocorrer com as bases nitrogenadas na presença de luz com energia adequada. Normalmente, no que tange o conhecimento específico da área, o professor costuma dominar mais o assunto do que seus alunos. Por mais que professores de Química não venham a dar aulas sobre reações pericíclicas na Educação Básica, espera-se que eles tenham domínio de conhecimentos desta Química mais “avançada” e além do Ensino Médio, pois é necessário que exista uma assimetria de conhecimento entre professores e alunos, essa assimetria é saudável e fundamental para o processo de ensino-aprendizagem [189].

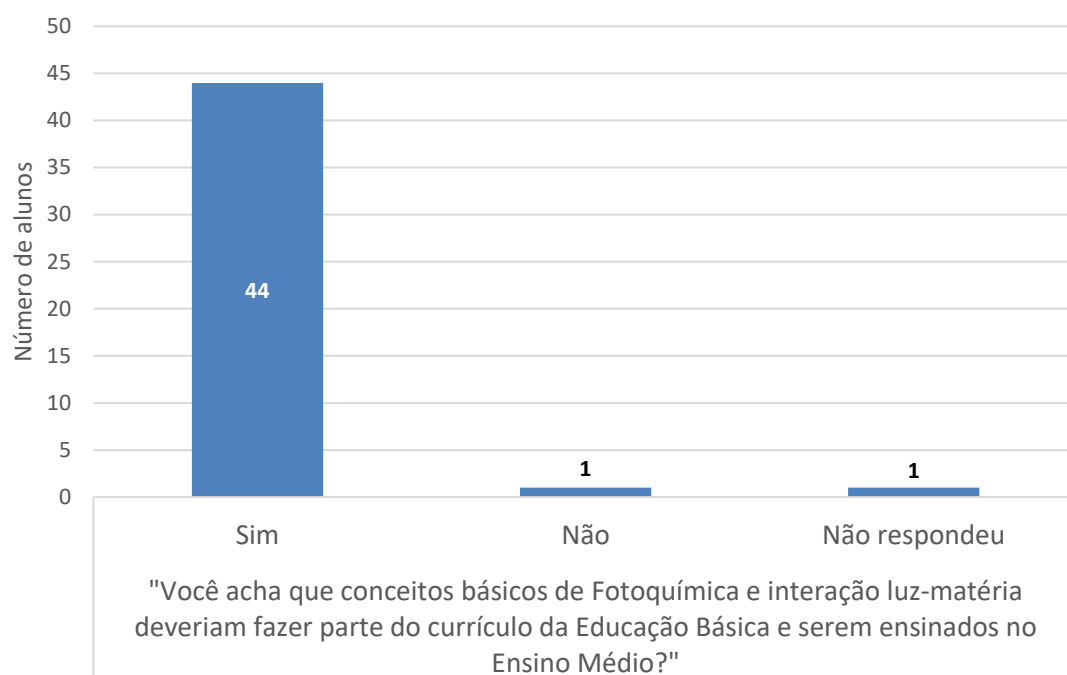
A 14ª questão foi a última a cobrar dos alunos conhecimentos de Química, objetiva e com três subitens, esta questão pedia que eles organizassem, em ordem crescente de comprimento de onda, três moléculas orgânicas semelhantes, mas com diferentes níveis de conjugação, de acordo com onde eles esperariam encontrar o comprimento de onda máximo de absorção em um espectro de absorção UV-Vis. Em outras palavras, basicamente pedia que organizassem as moléculas da menos conjugada para a mais conjugada. Não se esperava que alunos do Grupo 1 soubessem responder ou que

acertassem esta pergunta, uma vez que só se obtém um melhor domínio da Espectroscopia após realizar algumas disciplinas da graduação. A Figura 19 mostra o desempenho dos 46 alunos nesta questão. Apesar de já se esperar um número pequeno de acertos, foi uma surpresa constatar que menos do que 10% do total acertou e mais de 90% errou completamente ou nem respondeu. É algo preocupante pois imaginava-se que, no mínimo, cerca de metade dos alunos do Grupo 2 fosse capaz de enxergar um padrão entre a conjugação e a absorção de luz.

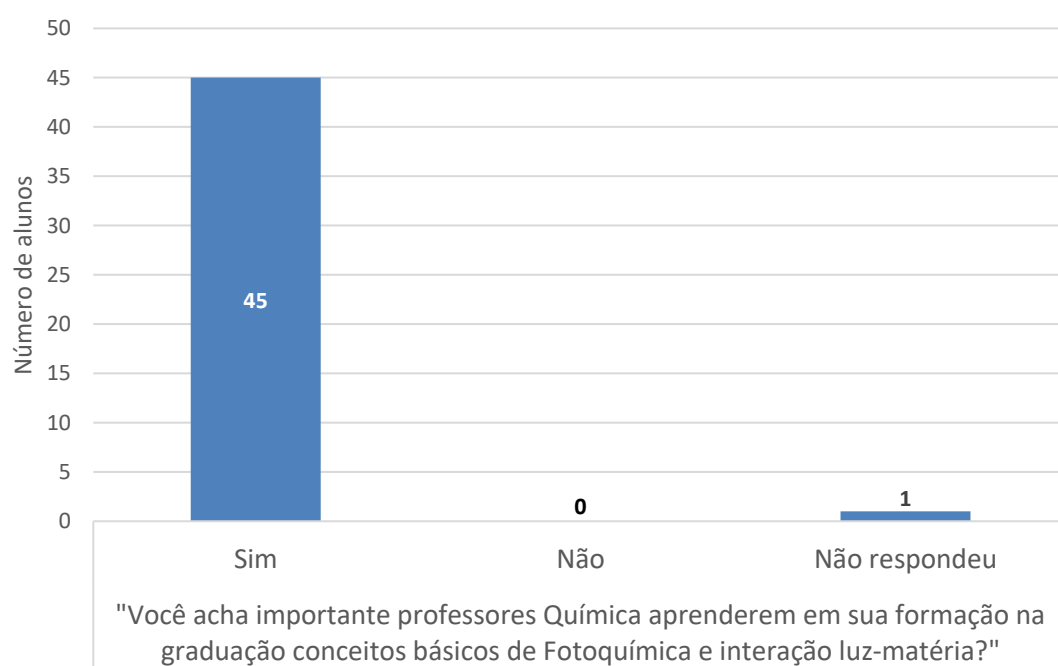


**Figura 19.** Desempenho dos alunos na pergunta nº 14 do questionário.

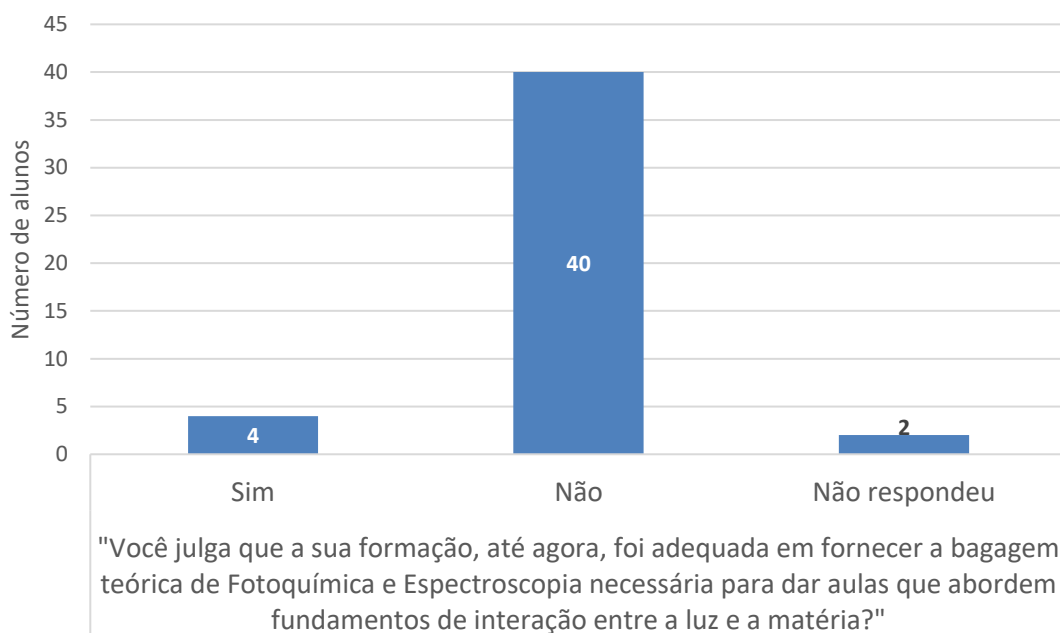
As três últimas perguntas do questionário eram mais voltadas à opinião dos alunos sobre a presença das interações luz-matéria nos currículos da Educação Básica (questão 15), e sobre formação de professores de Química para lidar com assuntos básicos de Fotoquímica e Espectroscopia no Ensino Médio (questões 16 e 17). Suas respostas se encontram nas Figuras 20, 21 e 22.



**Figura 20.** Respostas dos alunos para a pergunta nº 15.



**Figura 21.** Respostas dos alunos para a pergunta nº 16.



**Figura 22.** Respostas dos alunos para a pergunta nº 17.

Com base nas respostas dos alunos a estas perguntas, fica claro que praticamente todos os voluntários acreditam que conhecimentos ligados à interação luz-matéria devem fazer parte da Educação Básica brasileira e que professores de Química deveriam aprender conceitos básicos de Fotoquímica na graduação. Entretanto, a grande maioria dos avaliados não julga a formação apropriada em fornecer a bagagem teórica necessária para realizar a atividade docente no que tange assuntos ligados a Fotoquímica e Espectroscopia. Mesmo se fossem desconsiderados os 23 alunos do Grupo 1, por ainda estarem na primeira metade do curso e terem muitas oportunidades para aprender esses assuntos no decorrer da graduação, ainda assim apenas 4 alunos (todos do Grupo 2) acreditam ter uma bagagem teórica de luz-matéria sólida o suficiente para enfrentar estes assuntos com confiança em suas atividades docentes.

Apesar de somente uma pesquisa desta natureza não ser o suficiente para dar um veredito final, estes resultados já são um primeiro alerta de que melhorias devem ser pensadas e postas em prática no currículo de formação docente de Química na UFRJ. A grade curricular atual do curso de Licenciatura em Química da UFRJ não possui nenhuma disciplina, obrigatória ou eletiva, sobre Física ondulatória e óptica, sobre Espectroscopia ou sobre Fotoquímica, assim as chances dos alunos se defrontarem com assuntos desta natureza são menores e, quando ocorrem, são sempre dentro de outras disciplinas cujo foco não é prioritariamente a luz e suas interações com a matéria, o que leva a resultados

insatisfatórios e buracos conceituais na formação, que certamente terão impactos na futura atuação profissional. Apesar de uma disciplina ser um agente facilitador para apresentar os alunos a determinados conhecimentos, ela não é a única forma de se aprender algum assunto. Após passar por uma formação rigorosa e sólida em uma universidade como a UFRJ, todos são perfeitamente capazes de buscar livros e artigos e aprender por conta própria ao menos os fundamentos de uma área nova, além disso podem buscar participar de cursos, palestras e programas de formação continuada, que ajudem a “tapar os buracos”. Tendo tudo isso em mente, projetos universitários de extensão podem ser agentes de transformação neste sentido e oferecer atividades voltadas aos professores de Ciências da Educação Básica.

Em seu artigo 35, a LDB define como uma das finalidades do Ensino Médio “*a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática*”, para que os educandos possam se tornar cidadãos detentores do pleno domínio dos princípios científicos e tecnológicos que regem o mundo moderno. Desta forma, uma das funções do Educação Básica é o letramento científico<sup>2</sup>. De forma sucinta, existem três categorias do letramento científico: o prático, o cívico e o cultural. O primeiro envolve a forma como o conhecimento científico pode ser usado pelas pessoas para resolver problemas básicos humanos, ligados à saúde, alimentação, energia etc. O segundo diz respeito ao conhecimento necessário que uma sociedade deve ter para que se possa, conjuntamente, compreender problemas complexos ligados à Ciência, Tecnologia, Meio Ambiente, Poder e os impactos disso tudo na vida das pessoas através das políticas públicas. O terceiro já está ligado ao desejo de conhecer a Ciência, entendendo-a enquanto um grande feito e um produto cultural da Humanidade. As três formas de letramento científico são importantes na construção e manutenção de uma sociedade saudável, e passam por diversas esferas como a escola, a mídia, museus, livros e filmes [190].

Um dos deveres cívicos da escola, portanto, é o de não só alfabetizar e letrar linguisticamente os alunos, mas também letrar cientificamente, para formar cidadãos críticos em questões científicas e tecnológicas. Assim, é possível construir uma população

---

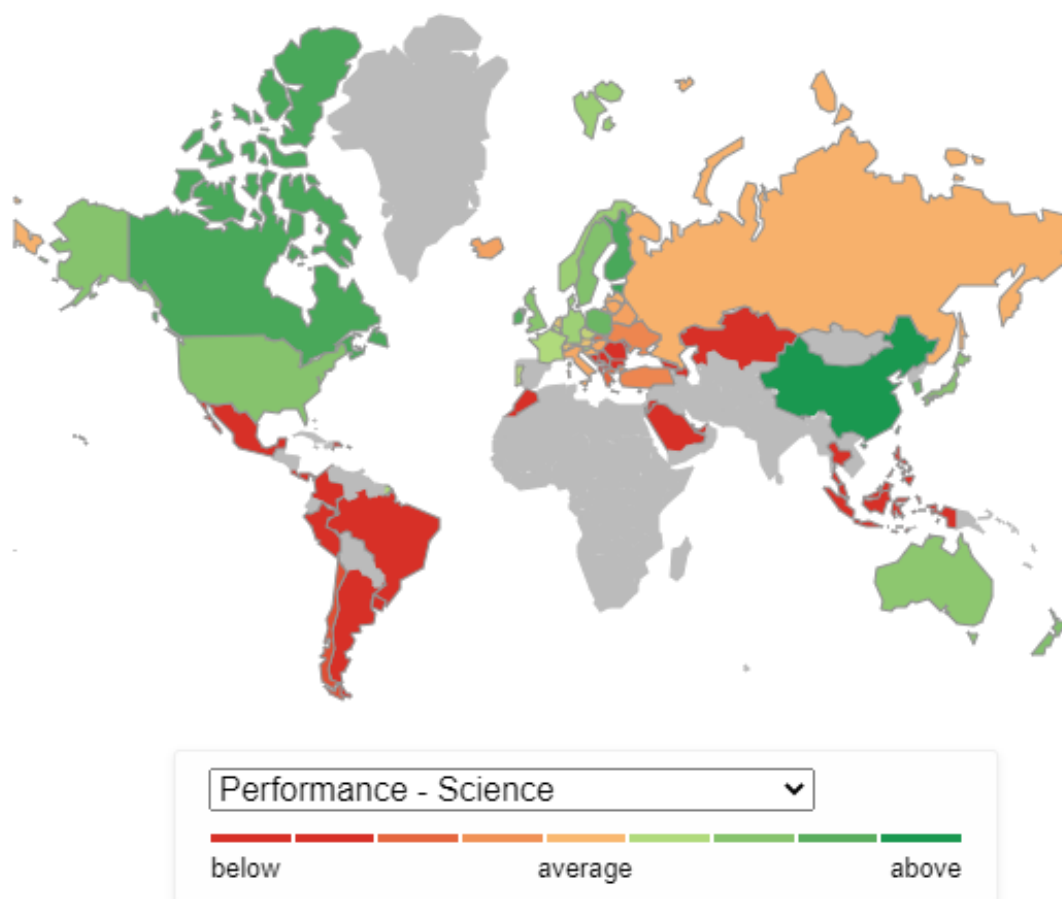
<sup>2</sup> Academicamente, existe um embate conceitual em torno do uso dos termos “alfabetização científica” e “letramento científico”, mas a finalidade deste trabalho não é se adentrar nestas discussões semânticas e será dado mais foco ao letramento científico [190].

consciente e intelectualmente autônoma, capaz de tomar decisões responsáveis e embasadas, de avaliar riscos e benefícios em questões científicas que impactam a sociedade, a economia e o meio ambiente, capaz de escolher representantes políticos responsáveis e de cobrá-los em relação às suas tomadas de decisões, bem como se posicionar da melhor forma diante de problemas complexos como novas epidemias e pandemias, mudanças climáticas, uso de recursos naturais e energéticos, preservação ambiental, ou mesmo em questões éticas ligadas ao avanço científico, como engenharia genética em seres humanos ou poluição espacial por satélites artificiais na baixa órbita terrestre. Porém os resultados obtidos nos questionários mostraram que os próprios alunos da Licenciatura em Química, futuros professores da Educação Básica, não possuem o domínio de conceitos fundamentais de Fotoquímica e não se sentem preparados para lidar com conhecimentos básicos sobre interação luz-matéria, tão importante em diversos processos produtivos e tecnológicos contemporâneos, requeridos pela LDB e BNCC. Com isso, é inviável esperar que os alunos oriundos do ensino básico tenham o nível mínimo de letramento científico, o que se reflete em avaliações nacionais e internacionais.

Existe, desde o ano 2000, uma rede de avaliação internacional cujo objetivo é justamente analisar o letramento de estudantes, de 15 e 16 anos, em Linguagens, Matemática e Ciências: o PISA (Programme for International Student Assessment), um programa mundial de avaliação de desempenho escolar, desenvolvido e coordenado pela OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), aplicado a cada três anos em alunos de diversos países membros e parceiros da Organização. No Brasil, o Inep (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira) é o responsável pela seleção dos alunos para as provas e sua aplicação. Em 2018, o PISA mais recente realizado, participaram ao todo 79 países [191].

Historicamente o Brasil tem um péssimo desempenho no PISA, sempre muito abaixo da média da OCDE e muito aquém das pontuações obtidas por países desenvolvidos, atrás, até mesmo, de países em desenvolvimento. Em 2018, a média dos países membros da OCDE para cada área foi de 487 para Leitura, 489 para Matemática e 489 para Ciências. O Brasil obteve para cada uma, respectivamente: 413, 384 e 404. Nosso país está centenas de pontos atrás de outras nações como, por exemplo, China – região de Pequim, Xangai, Jiangsu e Guangdong (Leitura: 555, Matemática: 591, Ciências: 590), Canadá (Leitura: 520, Matemática: 512, Ciências: 518) e Finlândia (Leitura: 520, Matemática: 507, Ciências: 522). Dentre os 79 países, o Brasil disputou em 2018 as últimas posições no ranking internacional, com a 57ª posição em Leitura, 70ª em

Matemática e 66ª em Ciências [191]. A Figura 24 mostra um mapa-múndi da performance dos países em Ciências no PISA de 2018, extraído da base de dados do site da OCDE, onde é possível obter também os mapas em relação às outras áreas e variáveis como gênero, background social e estudantes refugiados [192]. As Figuras A12 e A13, no anexo deste trabalho, exibem a tabela com os níveis de proficiência em Ciências do PISA (dividida em 6 níveis) e a tabela com as performances do Brasil no PISA dos anos 2000 a 2018.



**Figura 23.** Mapa-múndi da performance em Ciências no PISA de 2018. [192]

O PISA considera o nível 2 como sendo o mínimo de proficiência em qualquer área, neste nível os alunos conseguem reconhecer a explicação correta para alguns fenômenos científicos mais familiares e usar esse conhecimento para identificar, em casos simples, se uma conclusão é válida com base nos dados fornecidos. Em Ciências, somente cerca de 45% dos alunos brasileiros foram capazes de atingir o nível 2 ou acima, em contraste com a média da OCDE que é de 78%. Em 2018, mais da metade dos estudantes brasileiros entre 15 e 16 anos se encontram abaixo do nível 2 no PISA. Já os alunos que



atingem os níveis 5 ou 6 são considerados pelo Programa como os de melhor desempenho (“top performers”), estes alunos têm pleno domínio de pensamentos abstratos, são capazes de compreender fenômenos complexos e de aplicar de forma racional, autônoma e criativa seus conhecimentos sobre a Ciência em uma ampla variedade de situações e problemas, familiares ou não. Não existem alunos nível 6 no Brasil (média da OCDE: 0,8%) e apenas 0,8% dos brasileiros foi capaz de atingir o nível 5 (média da OCDE: 6,8%). A Tabela 3 mostra as distribuições de percentual de estudantes por nível de proficiência em Ciências no Brasil e na média dos países membros da OCDE em 2018 [193]. Enquanto nos países do mundo desenvolvido a maior porcentagem de jovens está no nível 3 de proficiência em Ciências (52,2% no nível 3 ou acima), no Brasil o maior percentual está no nível 1a, abaixo do que é considerado como o mínimo (apenas 19,3% no nível 3 ou acima; 55,3% abaixo do nível 2). Ainda deve se considerar que prova de Ciências é um reflexo não só do letramento científico dos alunos, mas também do seu letramento em leitura e do letramento matemático, pois a Ciência depende que os alunos tenham pleno domínio da Língua, para que sejam capazes de ler e interpretar corretamente os textos, bem como escrever de forma lógica e coerente, e que tenham também pleno comando da Matemática, uma vez que esta área é uma ferramenta fundamental para o raciocínio científico.

**Tabela 3.** Percentual de estudantes por nível de proficiência em Ciências – PISA 2018. Fonte: Relatório Brasil no PISA 2018 [193].

Nível	Escore Mínimo	Brasil	OCDE
<b>6</b>	708	0%	0,8%
<b>5</b>	633	0,8%	5,9%
<b>4</b>	559	4,6%	18,1%
<b>3</b>	484	13,9%	27,4%
<b>2</b>	410	25,3%	25,8%
<b>1<sup>a</sup></b>	335	31,4%	16,0%
<b>1b</b>	261	19,9%	5,9%
<b>Abaixo de 1b</b>	-	4,0%	0,7%

Somos uma nação de analfabetos funcionais e muito trabalho há de ser feito na Educação Básica para que este cenário mude. Ainda são poucas as pessoas que aplicam

de fato os conhecimentos e procedimentos científicos na resolução de seus problemas cotidianos. Não se trata de o cidadão brasileiro médio saber operar uma linha de luz em um síncroton, ou saber realizar cálculos quanto-mecânicos para obter a energia de transição de um semicondutor dentro de uma célula fotovoltaica, ou mesmo sair da escola sabendo operar um aparelho de Ressonância Magnética Nuclear. Trata-se de algo muito mais simples, como conseguir ler e entender o que está escrito na bula de um remédio que trata malária, ou infecção por piolhos e sarna, e compreender que ele não serve para tratar de uma nova doença viral; de ler e saber interpretar as informações no rótulo de um alimento; saber estimar seu consumo de energia elétrica com base nas especificações técnicas de seus eletrodomésticos; de entender que beber suco de limão com bicarbonato de sódio não irá curar um câncer; ou, até mesmo, entender que as radiações eletromagnéticas emitidas por aparelhos celulares e por fornos de micro-ondas não são cancerígenas. O brasileiro carece urgentemente de letramento científico, para entender que o mundo não é sobrenatural ou mágico e que existe lógica na Natureza. A Ciência é a nossa vela em um mar de escuridão e ignorância. Não vivemos mais na Idade Média para termos medo de monstros imaginários. Existem “monstros de verdade”, que são devastadores, eles se chamam: “aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e demais gases de efeito estufa”, “superbactérias resistentes a todo o arsenal de antibióticos que se conhece”, “desmatamento de florestas tropicais”, “depleção de ozônio estratosférico”, “extinções em massa”, “acidificação dos oceanos e aumento do nível do mar” etc. Isso sem contar os líderes poderosos (e lunáticos) com acesso a armas letais de aniquilação total, como bombas atômicas, capazes de desintegrar cidades inteiras em segundos e provocar um inverno nuclear no planeta. Como alguém poderia opinar sobre estes ou quaisquer outros assuntos sem realmente entender o que é um átomo, uma molécula, um vírus ou uma célula? Uma sociedade não letrada, ou pior, analfabeta cientificamente, com tecnologia e poder nas mãos é uma receita para o fracasso e destruição.

Todos os ramos da “árvore da Ciência” são relevantes, a educação e a divulgação científica têm um papel social importantíssimo. A Ciência precisa tornar seus métodos e resultados mais claros e acessíveis a todos, não só aos membros da comunidade científica. O dever de letrar cientificamente a população não é de uma única profissão, ele está, de certa forma, na mão de todos: professores, jornalistas, cientistas, escritores, divulgadores científicos, empresários, políticos, médicos, engenheiros etc. A Fotoquímica é só um dos galhos desta árvore e, apesar de ser nova, já contribuiu muito para a sociedade e tem o potencial de contribuir muito mais. Fotoquímicos podem ajudar a solucionar de diversos

problemas do mundo contemporâneo, nas mais variadas áreas, como saúde, tecnologia, arte, meio ambiente e energia. Seria interessante que alguns conhecimentos importantes na Fotoquímica fossem mais disseminados e se tornassem mais comuns na Escola e na Mídia, desde as noções de níveis de energia quantizados, estados, transições eletrônicas, fótons e luminescência a questões como fotocatalise, fotoestabilidade, fototoxicidade, reações fotoquímicas, conhecimentos sobre o funcionamento de dispositivos luminescentes como lâmpadas, LEDs e lasers e questões de saúde ligadas à luz, como a síntese da vitamina D, o poder carcinogênico da radiação UV (e formas de prevenção) ou o ciclo circadiano humano.

Tendo em vista os resultados obtidos e apresentados nesta seção do trabalho, uma possível atividade a se pensar sobre organizar e realizar futuramente é a criação de um minicurso de extensão sobre Fotoquímica voltado para professores da Educação Básica, que possa ajudar a suprir defasagens teóricas de educadores neste contexto da Reforma do Ensino Médio brasileiro e da homologação da Base Nacional Comum Curricular, que contempla aprendizagens ligadas a interações luz-matéria. Muito já foi feito, porém ainda há muito a se fazer. De forma geral, projetos de extensão têm um papel importante no combate à defasagem de conhecimento, não só de interação luz-matéria, observada neste trabalho, mas de diversas áreas de conhecimento. O projeto de extensão “Luz, Química, Ação!”, do IQ-UFRJ, é um exemplo de que a extensão universitária pode contribuir para solucionar estes problemas educacionais, por meio de atividades de divulgação científica e da mediação didática do conhecimento científico, ajudando a tornar a Ciência mais acessível a todos. A extensão é um instrumento poderoso para ajudar a diminuir a distância entre a Universidade e a Sociedade, ela é uma das formas de atacar o problema do analfabetismo brasileiro em áreas tão importantes como a Ciência e pode ajudar a promover o letramento científico da população.

Em tempos onde a internet ganhou tanta força e provoca a 4ª Revolução Industrial, sabemos que o futuro é um híbrido digital-presencial, e que para educar as pessoas, fazê-las conhecer mais sobre o paradigma fotoquímico, será necessário ocupar também os espaços virtuais. Num contexto pós-pandemia, devem ser retomadas as atividades presenciais e continuar os trabalhos que já vinham ocorrendo, mas será necessário pensar também em planos para a ocupação do universo digital, por exemplo com a criação de vídeos de divulgação científica e publicações sobre Ciência em mídias sociais digitais. As plataformas digitais podem ser grandes aliadas de projetos de extensão que visem a mediação e divulgação científica, e devem ser explorados.

Como disse o astrônomo, escritor e divulgador científico Carl Sagan, em uma palestra sua sobre as missões Voyager, que ele deu na Universidade Cornell em 1994: “Our planet is a lonely speck in the great enveloping cosmic dark. In our obscurity, in all this vastness, there is no hint that help will come from elsewhere to save us from ourselves.”. Em resposta a Sagan, acredito que nós, seres humanos, teremos de aprender a ser a nossa própria ajuda e a nossa própria salvação, pois a ignorância coletiva e o poder científico-tecnológico são uma mistura perigosa e explosiva. Precisaremos matar os monstros que nós ajudamos a criar, antes que eles nos matem, pois este pequeno ponto pálido azul onde moramos, imerso na escuridão cósmica onde vivemos, é a nossa casa e, ao menos até o presente momento, é a única que temos em todo o Universo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Fotoquímica é um ramo recente da Ciência, mas ela já proporcionou muito progresso à sociedade graças a melhor compreensão da Natureza, por meio do estudo das interações da luz com a matéria. Hoje sabe-se que tudo nesta área passa pelo estado excitado, entender o seu papel na Química é de suma importância para a pesquisa e criação de novas tecnologias. Dada a relevância dos estados excitados e o seu papel paradigmático na Fotoquímica, este trabalho se dedicou a estudá-los por uma perspectiva histórica e a discutir seu papel na Ciência e na sociedade.

Thomas Samuel Kuhn foi um dos grandes filósofos do século XX e uma de suas obras de maior impacto foi o livro “A Estrutura das Revoluções Científicas”, onde o autor faz uma detalhada análise histórico-filosófica dos mecanismos de evolução da Ciência. Neste trabalho, Kuhn foi usado como um referencial teórico para a elaboração de uma análise da História da Fotoquímica no mundo e no Brasil. Além da Filosofia da Ciência de Kuhn, a História da luz – desde Alhazen até a Mecânica Quântica – também foi uma base de fundamentação teórica para a construção deste trabalho, pois entende-se que, antes que a Fotoquímica pudesse emergir enquanto uma área independente, foi necessário que primeiramente os cientistas entendessem a natureza das radiações eletromagnéticas.

A Fotoquímica não tem uma data e um local exatos de surgimento, ela é o resultado de esforços coletivos de cientistas de diversas nações que viveram em momentos históricos diferentes. Uma das primeiras reações fotoquímicas que se tem registro é a do produto natural “santonina”, estudada em meados do século XIX pelo químico e farmacêutico alemão Herman Trommsdorff. Seu trabalho motivou outros cientistas a investigarem esta e outras reações químicas provocadas pela luz, dentre eles os químicos italianos Fausto Alessandro Sestini e Stanislao Cannizzaro. Muitos pesquisadores contribuíram para as primeiras descobertas de reações fotoquímicas, mas um aluno de Cannizzaro, em especial, merece uma posição de destaque: o químico austríaco-italiano Giacomo Ciamician, um cientista além de seu tempo e um químico brilhante, que dedicou sua vida à Fotoquímica apesar de todas as dificuldades teóricas e experimentais da época. Sua palestra “The Photochemistry of the Future”, em 1912, evidencia como ele já estava consciente, no século passado, de problemas que viriam afligir a população mundial futuramente, como o uso excessivo de fontes de energia fósseis e todos os impactos que se derivariam disso, além de já ambicionar em questões ligadas a temas modernos da Ciência, como Biotecnologia e fotossíntese artificial.

Ciamician merece, por todos seus esforços para o avanço da área, ser considerado o pai da Fotoquímica.

Do século XX em diante a Fotoquímica amadureceu muito, principalmente com os avanços da Física na Mecânica Quântica e na Relatividade. É impossível fazer Fotoquímica hoje sem pensar em conceitos como quantização de energia, níveis de energia, estados ou fótons. Além de batizar o quantum de luz como “fóton”, o físico-químico estadunidense Gilbert Newton Lewis, junto de seu aluno Michael Kasha, também foi o responsável por dar o nome de uma peça fundamental para todos os fotoquímicos, o Diagrama de Jablonski. Além disso, Lewis e Kasha provocaram uma revolução científica ao mostrarem que o estado excitado triplete é a entidade responsável pela fosforescência em compostos orgânicos, um problema que assolava físicos e químicos há décadas. Na segunda metade do século XX, em 1967, a Fotoquímica se fez presente até mesmo no Prêmio Nobel, graças a Ronald George Wreyford Norrish e George Porter, dois grandes químicos ingleses e criadores da fotólise por pulso, técnica central para os estudos com resolução temporal, que permitem entender melhor a natureza dos estados excitados. Além deles, também foram citados nesta análise histórica outros cientistas que tiveram um papel importante para o desenvolvimento da Fotoquímica, como o físico alemão Theodor Förster, os químicos estadunidenses George Simms Hammond e Nicholas J. Turro e o químico argentino Juan Cesar Scaiano.

Foi necessário dar maior enfoque a algumas histórias em detrimento de outras e realizar diversos recortes na História da Fotoquímica mundial, pois seria impossível narrar tudo aquilo já ocorrera no mundo. Da mesma forma, na História da Fotoquímica brasileira estes recortes foram necessários, pois o Brasil é um país imenso e não existe muito material documentado e disponível na internet, além de alguns poucos artigos de professores do IQ-USP, também se optou por dar maior destaque nesta narrativa ao que ocorrera no Rio de Janeiro. O Laboratório de Fotoquímica do IQ-UFRJ foi o primeiro de seu tipo a surgir no estado, 50 anos atrás. O professor David Ernest Nicodem, fotoquímico estadunidense que veio para o Brasil em 1973 através do Programa de Cooperação Internacional CNPq-NAS, foi o responsável por dar início a primeira árvore genealógica da Fotoquímica carioca. Ele formou dezenas de alunos no Instituto de Química da UFRJ, alguns dos quais também se tornaram professores universitários e permaneceram pesquisando sobre Fotoquímica. Atualmente a Fotoquímica no Rio de Janeiro não se resume apenas ao Laboratório de Fotoquímica do IQ-UFRJ, sugeriram outros núcleos na UFRRJ, na UFF e até mesmo dentro do IQ-UFRJ. Hoje existe uma comunidade sólida e

ativa na área em nosso estado, bem como em diversas outras partes do país, reconhecidas pela Sociedade Brasileira de Química e pela Inter-American Photochemical Society, o que evidencia o sucesso do Programa CNPq-NAS na implementação da Fotoquímica no Brasil.

A fim de avaliar qualitativamente o domínio de conceitos ligados a interação luz-matéria de alunos do curso de Licenciatura em Química do IQ-UFRJ, foi elaborado um questionário com 12 perguntas objetivas e 5 discursivas, presente no apêndice deste trabalho. Avaliou-se, durante o segundo semestre letivo de 2019 na UFRJ, um total de 46 alunos de diversos períodos. A maioria dos alunos já tinha ouvido falar sobre Fotoquímica e alguns de seus termos. Muitos alunos foram capazes de reconhecer a presença da área em seu cotidiano, dando exemplos como lâmpadas, LEDs, fotossíntese, visão, células solares, corantes e alguns até citaram fenômenos luminescentes e fenômenos ligados a saúde, como a síntese fotoquímica da vitamina D, a regularização do ciclo circadiano pela luz e os efeitos provocados pela luz na pele. Quando questionados sobre fenômenos que podem ocorrer com uma molécula a partir do estado excitado, a maioria citou algo ligado à emissão de luz e alguns deram respostas envolvendo reações fotoquímicas, demonstrando conhecer que há transformações químicas além do estado fundamental.

Quase todos os voluntários foram capazes de fazer o uso do círculo cromático e prever corretamente as cores de objetos com base na informação da luz absorvida, entretanto poucos conseguiram correlacionar corretamente as diferentes regiões do espectro eletromagnético com os fenômenos físico-químicos que elas provocam. Menos da metade dos alunos sabia que são os cones e os bastonetes os responsáveis pela visão e apenas 12, dos 46 estudantes, conseguiram correlacionar corretamente todos os estados ( $S_0$ ,  $S_1$  e  $T_1$ ) aos respectivos diagramas HOMO-LUMO. A grande maioria teve dificuldades em responder às três últimas perguntas discursivas do questionário, que tratavam sobre a definição e diferença entre a fluorescência e a fosforescência, sobre dispositivos luminescentes e seus diferentes mecanismos de funcionamento e sobre a correlação entre a exposição excessiva à radiação solar UV e os danos ao DNA, que podem ocasionar mutações e doenças de pele. Além disso, pouquíssimos alunos foram capazes de reconhecer a correlação entre a conjugação eletrônica em moléculas orgânicas e a absorção de luz. Praticamente todos os voluntários disseram acreditar que conhecimentos ligados à interação luz-matéria devem fazer parte da Educação Básica brasileira e que professores de Química deveriam aprender conceitos básicos de Fotoquímica na graduação. Entretanto, somente uma minoria julga ter recebido a

formação apropriada, em assuntos ligados a Fotoquímica e Espectroscopia, para poderem dar aulas sobre assuntos que envolvam interação luz-matéria, o que pode prejudicar a assimetria de conhecimento entre professores e alunos necessária no processo de ensino-aprendizagem, pois se o próprio professor não sabe, logo não há assimetria.

Discutiu-se ainda sobre o letramento científico e o desempenho brasileiro no PISA (Programme for International Student Assessment), avaliação internacional da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) que analisa trienalmente o letramento de estudantes, entre 15 e 16 anos, em Leitura, Matemática e Ciências. Observou-se que o Brasil tem, historicamente, um desempenho vergonhoso no PISA, sempre muito abaixo da média dos países membros da OCDE, disputando as últimas colocações no ranking internacional. Isso explicita o tamanho do problema educacional que o gigante sul-americano tem de resolver e mostra que muito trabalho ainda deve ser feito, em diversas esferas da sociedade, para que este cenário de analfabetismo funcional possa mudar. A população precisa aprender a aplicar os conhecimentos e procedimentos científicos na resolução de seus problemas cotidianos. Em contrapartida, os cientistas precisam tornar seus métodos e resultados mais claros e acessíveis a todos, não só aos membros da comunidade científica, pois o dever de letrar cientificamente a sociedade não é apenas dos professores de ciências da Educação Básica, mas sim de todos.

Tendo em vista que no século XXI a Fotoquímica fará parte da solução de muitos dos grandes problemas da humanidade, ela será cada vez mais presente na vida do cidadão, por isso é tão importante que alguns conhecimentos centrais da Fotoquímica sejam mais disseminados e se tornem comuns na Escola e na Mídia, desde noções básicas sobre Quântica e a Óptica a algumas reações fotoquímicas e aplicações tecnológicas. Projetos de extensão universitária podem ajudar a aproximar a Fotoquímica das pessoas, mediando didaticamente seus conceitos e trabalhando para tornar este ramo da Ciência acessível a todos, seja presencialmente ou por via digital, através da divulgação científica em redes sociais na internet. É importante, ainda, que esses projetos busquem atingir, além de estudantes, os professores da Educação Básica, para poder contribuir no complexo trabalho que é o letramento científico.



## 8. REFERÊNCIAS

1. NASA. **July 20, 1969: One Giant Leap For Mankind**, 2019. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/apollo/apollo11.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/apollo11.html)>. Acesso em: 19 mar. 2020.
2. NASA. **Voyager**, 2020. Disponível em: <<https://voyager.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
3. NASA. **NASA's Voyager 2 Probe Enters Interstellar Space**, 2018. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-voyager-2-probe-enters-interstellar-space>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
4. NASA. **Your Device has More Computing Power**, 2013. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/voyager/multimedia/vgrmemory.html#.XnzFyohKjIW](https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/multimedia/vgrmemory.html#.XnzFyohKjIW)>. Acesso em: 19 mar. 2020.
5. CPUSHACK.NET. **The CPUs of Spacecraft Computers in Space**, 2012. Disponível em: <<http://www.cpushack.com/space-craft-cpu.html>>. Acesso em: 25 mar. 2020.
6. HOLLISTER, S. The Verge. **Apple says its new A13 Bionic chip brings hours of extra battery life to new iPhones**, 2019. Disponível em: <<https://www.theverge.com/circuitbreaker/2019/9/10/20857177/apple-iphone-11-processor-a13-cpu-speed-graphics-specs>>. Acesso em: 25 mar. 2020.
7. HUBLIN, J.-J. et al. New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens. **Nature**, 546, n. 7657, 08 junho 2017. 289–292.
8. BOCQUET-APPEL, J.-P. When the World's Population Took Off: The Springboard of the Neolithic Demographic Transition. **Science**, 333, n. 6042, 29 jul. 2011. 560-561.
9. SILVA, C. M.; ARBILLA, G. Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo. **Revista Virtual de Química**, 10, n. 6, 29 mar. 2018. 1619-1647.
10. SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS ATÉ A INDÚSTRIA 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, 15, n. 2, 30 dez. 2018. 480-491.
11. LIMA, A. G.; PINTO, G. S. INDÚSTRIA 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, 16, n. 2, 21 dez. 2019. 299-311.
12. AIRES, R. W. D. A.; MOREIRA, F. K.; FREIRE, P. D. S. Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento. **SUCEG - Seminário de Universidade Corporativa e Escolas de Governo**, 1, n. 1, 08 dez. 2017. 224-247. Disponível em: <<http://anais.suceg.ufsc.br/index.php/suceg/article/view/49>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

13. KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. [S.l.], p. 12-25. 2013.
14. LAZER, D. M. J. et al. The science of fake news. **Science**, 359, n. 6380, 09 mar. 2018. 1094-1096.
15. CERN. **A short history of the Web**, 2020. Disponível em:  
<<https://home.cern/science/computing/birth-web/short-history-web>>. Acesso em: 22 mar. 2020.
16. MATTERN, F.; FLÖRKEMEIER, C. Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. **Informatik Spektrum**, 33, fev. 2010. 107–121.
17. PAL, A. Internet of Things: Making the Hype a Reality. **IT Professional**, 17, n. 3, jun. 2015. 2-4.
18. PERERA, C.; LIU, C. H.; JAYAWARDENA, S. The Emerging Internet of Things Marketplace From an Industrial Perspective: A Survey. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing**, 3, n. 4, dez. 2015. 585-598.
19. VASHIST, S. K.; SCHNEIDER, E. M.; LUONG, J. H. T. Commercial Smartphone-Based Devices and Smart Applications for Personalized Healthcare Monitoring and Management. **Diagnostics**, 4, n. 3, ago. 2014. 104-128.
20. PAYNE, K. F. B.; WHARRAD, H.; WATTS, K. Smartphone and medical related App use among medical students and junior doctors in the United Kingdom (UK): a regional survey. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, 12, out. 2012.
21. MOSA, A. S. M.; YOO, I.; SHEETS, L. A Systematic Review of Healthcare Applications for Smartphones. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, 12, jul. 2012.
22. LUXTON, D. D. . M. R. A. . B. N. E. . M. M. C. . & R. G. M. mHealth for Mental Health: Integrating Smartphone Technology in Behavioral Healthcare. **Professional Psychology: Research and Practice**, 42, n. 6, 2011. 505–512.
23. ARUTE, F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. **Nature**, 574, n. 7779, 23 out. 2019. 505–510.
24. SAGAN, C. **O mundo assombrado pelos demônios: a ciência vista como uma vela no escuro**. 1ª. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.
25. LIMA, J. A. D. O.; PASSOS, E.; NICOLA, J. R. **A Gênese do Texto da Constituição de 1988**. Brasília: Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, v. I, 2013. XIX-XXVI p. Disponível em:

<<http://www.senado.leg.br/publicacoes/GeneseConstituicao/pdf/genese-cf-1988-1.pdf>>.

26. BRASIL. **LEI Nº 13.415, DE 16 DE FEVEREIRO DE 2017**, 2017. Disponível em:  
<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2017/Lei/L13415.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13415.htm)>. Acesso em: 21 mar. 2020.
27. BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**, 2018. Disponível em:  
<<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/>>. Acesso em: 22 mar. 2020.
28. BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio**, 2018. Disponível em:  
<<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#medio>>. Acesso em: 22 mar. 2020.
29. GRÄTZEL, M. Dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, 4, n. 2, 31 out. 2003. 145-153.
30. MANCEAU, M. et al. Photochemical stability of  $\pi$ -conjugated polymers for polymer solar cells: a rule of thumb. **Journal of Materials Chemistry**, 21, n. 12, 04 fev. 2011. 4132-4141.
31. CHENG, Y. Y. et al. Improving the light-harvesting of amorphous silicon solar cells with photochemical upconversion. **Energy & Environmental Science**, 5, n. 5, 09 fev. 2012. 6953-6959.
32. ANSARI, M. I. H.; QURASHI, A.; NAZEERUDDIN, M. K. Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, 35, jun. 2018. 1-24.
33. NAKAZAKI, J.; SEGAWA, H. Evolution of organometal halide solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, 35, jun. 2018. 74-107.
34. MOTTI, S. G. . M. D. . B. A. J. E. A. Controlling competing photochemical reactions stabilizes perovskite solar cells. **Nature Photonics**, 13, 27 maio 2019. 532–539.
35. ZIEGENBALG, D. et al. OLEDs as prospective light sources for microstructured photoreactors. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 13, n. 7, 19 fev. 2014. 1005-1015.
36. REINEKE, S. Complementary LED technologies. **Nature Materials**, 14, 22 abr. 2015. 459–462.
37. KAMAT, P. V. Photochemistry and Light Energy Conversion. **ACS Energy Letters**, 2, n. 9, 8 set. 2017. 2157-2158.

38. SUN, H. et al. Improvement of Photoluminescence of Graphene Quantum Dots with a Biocompatible Photochemical Reduction Pathway and Its Bioimaging Application. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 12, n. 13, 22 jan. 2013. 1174-1179.
39. MOSCONI, D. et al. Synthesis and Photochemical Applications of Processable Polymers Enclosing Photoluminescent Carbon Quantum Dots. **ACS Nano**, 9, n. 4, 15 mar. 2015. 4156-4164.
40. PLAETZER, K. et al. Photophysics and photochemistry of photodynamic therapy: fundamental aspects. **Lasers in Medical Science**, 24, 5 fev. 2008. 259–268.
41. TEDESCO, A. C.; ROTTA, J. C. G.; LUNARDI, C. N. Synthesis, Photophysical and Photochemical Aspects of Phthalocyanines for Photodynamic Therapy. **Current Organic Chemistry**, 7, n. 2, 2003. 187 - 196.
42. CASTANO, A. P.; DEMIDOVA, T. N.; HAMBLIN, M. R. Mechanisms in photodynamic therapy: part one—photosensitizers, photochemistry and cellular localization. **Photodiagnosis and Photodynamic Therapy**, 1, n. 4, dez. 2004. 279-293.
43. JARVI, M. T.; PATTERSON, M. S.; WILSON, B. C. Insights into Photodynamic Therapy Dosimetry: Simultaneous Singlet Oxygen Luminescence and Photosensitizer Photobleaching Measurements. **Biophysical Journal**, 102, n. 3, 08 fev. 2012. 661-671.
44. HAMBLIN, M. R. Antimicrobial photodynamic inactivation: a bright new technique to kill resistant microbes. **Current Opinion in Microbiology**, 33, out. 2016. 67-73.
45. SURPATEANU, G. G. et al. Photochemical behaviour upon the inclusion for some volatile organic compounds in new fluorescent indolizine  $\beta$ -cyclodextrin sensors. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 185, 25 jan. 2007. 312-320.
46. KIM, S.; FUJITSUKA, M.; MAJIMA, T. Photochemistry of Singlet Oxygen Sensor Green. **The Journal of Physical Chemistry B**, 117, n. 45, 10 out. 2013. 13985-13992.
47. ROMERO, V. et al. Turn-on fluorescent sensor for the detection of periodate anion following photochemical synthesis of nitrogen and sulphur co-doped carbon dots from vegetables. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 280, 1 fev. 2019. 290-297.
48. LIU, H. et al. High performance fluorescence biosensing of cysteine in human serum with superior specificity based on carbon dots and cobalt-derived recognition. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 280, 1 fev. 2019. 62-68.
49. YANG, Y. et al. Ratiometric fluorescence detection of mercuric ions by sole intrinsic dual-emitting gold nanoclusters. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 278, 1 jan. 2019. 82-87.
50. RADHAKRISHNAN, K.; SIVANESAN, S.; PANNEERSELVAM, P. Turn-On fluorescence sensor based detection of heavy metal ion using carbon dots@graphitic-carbon nitride

- nanocomposite probe. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 389, 15 fev. 202.
51. YOON, T.; ISCHAY, M.; DU, J. Visible light photocatalysis as a greener approach to photochemical synthesis. **Nature Chemistry**, 2, 23 jun. 2010. 527–532.
  52. KAMAT, P. V. Photophysical, Photochemical and Photocatalytic Aspects of Metal Nanoparticles. **The Journal of Physical Chemistry B**, 106, n. 32, 18 jul. 2002. 7729-7744.
  53. BORGARELLO, E. . K. J. . P. E. E. A. Photochemical cleavage of water by photocatalysis. **Nature**, 289, 15 jan. 1981. 158–160.
  54. ISMAIL, A. A.; BAHNEMANN, D. W. Photochemical splitting of water for hydrogen production by photocatalysis: A review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 128, set. 2014. 85-101.
  55. SILVA, C. G.; WANG, W.; FARIA, J. L. Photocatalytic and photochemical degradation of mono-, di- and tri-azo dyes in aqueous solution under UV irradiation. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 181, 31 jul. 2006. 314-324.
  56. KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. Tradução de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 13ª. ed. São Paulo: Perspectiva, 2017.
  57. WAYNE, C. E.; WAYNE, R. P. **Photochemistry**. Oxford: Oxford University Press, 1996.
  58. WARDLE, B. **Principles and Applications of Photochemistry**. West Sussex: Wiley, 2009.
  59. TURRO, N. J.; RAMAMURTHY, V.; SCAIANO,. **Modern Molecular Photochemistry of Organic Molecules**. Mill Valley, California: University Science Books, 2010.
  60. ANSLYN, E. V.; DOUGHERTY, D. A. **Modern Physical Organic Chemistry**. [S.l.]: University Science Books, 2006.
  61. BERGAMINI, G.; SILVI, S. (Eds.). **Applied Photochemistry: When Light Meets Molecules**. Switzerland: Springer, v. 92, 2016.
  62. BRASIL. **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988**, 1988. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em: 20 mar. 2020.
  63. BRASIL. **LEI 9.394/1996**: Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, 1996. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm)>. Acesso em: 20 mar. 2020.
  64. BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**: Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Ensino Médio, 2018. Disponível em:

- <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#medio/a-area-de-ciencias-da-natureza-e-suas-tecnologias>>. Acesso em: 24 mar. 2020.
65. JÚNIOR, W. A. D.; WINDMÖLLER, C. C. A Questão do Mercúrio em Lâmpadas Fluorescentes. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 28, maio 2008. 15-19.
66. RAFFA, R. B. et al. Sunscreen bans: Coral reefs and skin cancer. **Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics**, 44, n. 1, 28 nov. 2018. 134–139.
67. TRAGER, R. Florida city bans sunscreens with chemicals thought to harm coral. **Chemistry World**, 2019. Disponível em: <<https://www.chemistryworld.com/news/florida-city-bans-sunscreens-with-chemicals-thought-to-harm-coral/3010110.article>>. Acesso em: 04 abr. 2020.
68. TRAGER, R. Hawaii bans sunscreens containing chemicals thought to harm coral. **Chemistry World**, 2018. Disponível em: <<https://www.chemistryworld.com/news/hawaii-bans-sunscreens-containing-chemicals-thought-to-harm-coral/3009243.article>>. Acesso em: 04 abr. 2020.
69. HARPER, K. ACS. **So Tired in the Morning. The Science of Sleep**, 2015. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2014-2015/the-science-of-sleep.html>>. Acesso em: 04 abr. 2020.
70. TOMA, H. E. A nanotecnologia das moléculas. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 21, maio 2005. 3-9. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc21/v21a01.pdf>>.
71. OLIVEIRA, P. C. C.; LEITE, M. A. P. Espectrofotometria no Ensino Médio. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 38, n. 2, maio 2016. 181-184. Disponível em: <[http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38\\_2/13-EEQ-58-14.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_2/13-EEQ-58-14.pdf)>.
72. JARDIM, W. F. A evolução da atmosfera terrestre. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, maio 2001. 5-8. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/evolucao.pdf>>.
73. SILVA, C. N. et al. Ensinando a Química do Efeito Estufa no Ensino Médio: Possibilidades e Limites. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 31, n. 4, nov. 2009. 268-274. Disponível em: <[http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31\\_4/09-PE-1208.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_4/09-PE-1208.pdf)>.
74. VIDAL, R. M. B.; MELO, R. C. A Química dos Sentidos – Uma Proposta Metodológica. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 35, n. 1, ago. 2013. 182-188. Disponível em: <[http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc35\\_3/07-RSA-163-12.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc35_3/07-RSA-163-12.pdf)>.
75. LEITE, M. A. P. **FOTÔMETRO PORTÁTIL DE BAIXO CUSTO: EXPERIMENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO NO ENSINO DE QUÍMICA DA EDUCAÇÃO BÁSICA**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Química, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Federal de Alagoas. Maceió – Alagoas, p. 32-46. 2014.

76. SILVA, G. S. **A ABORDAGEM DO MODELO ATÔMICO DE BOHR ATRAVÉS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS E DE MODELAGEM**. Dissertação de Mestrado em Educação em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - Rio Grande do Sul, p. 61-90. 2013.
77. NERY, A. L. P.; FERNANDEZ, C. Fluorescência e Estrutura Atômica: Experimentos Simples para Abordar o Tema. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, 19, maio 2004. 39-42. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc19/19-a12.pdf>>.
78. GOUVEIA-MATOS, J. A. D. M. Mudanças nas Cores dos Extratos de Flores e do Repolho Roxo. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, nov. 1999. 6-10. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc10/conceito.pdf>>.
79. FARIAS, F. M. C. D.; CUNHA, M. F. V. D.; MACEDO, K. R. M. **O ENSINO DAS REAÇÕES FOTOQUÍMICAS NO COTIDIANO DOS ALUNOS**. III Encontro Nacional de Ensino de Ciências da Saúde e do Ambiente, Universidade Federal Fluminense. Niterói - Rio de Janeiro, p. 1-14. 2012.
80. DE LUCAS, N. C. et al. **LUZ, QUÍMICA, AÇÃO!** 9ª Semana de Integração Acadêmica da UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.
81. INEP - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Provas e Gabaritos. **Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira - INEP (MEC)**, 2019. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/provas-e-gabaritos>>. Acesso em: 26 mar. 2020.
82. FUVEST. **Prova de Conhecimentos Gerais - FUVEST 2015**, 2015. Disponível em: <[https://acervo.fuvest.br/fuvest/2016/fuv2016\\_1fase\\_prova\\_V.pdf](https://acervo.fuvest.br/fuvest/2016/fuv2016_1fase_prova_V.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2020.
83. FONSECA, M. R. D. **Química: Ensino Médio**. 1ª. ed. São Paulo: Ática, v. 1, 2013.
84. PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. D. **Química na abordagem do cotidiano: volume único**. 4ª. ed. São Paulo: Moderna, 2012.
85. LISBOA, J. C. F. et al. **Ser Protagonista: Química 1º ano ensino médio**. 3ª. ed. São Paulo: Edições SM, v. 1, 2016.
86. HAMERSKI, L.; REZENDE, M. J. C.; SILVA, B. V. D. Usando as Cores da Natureza para Atender aos Desejos do Consumidor: Substâncias Naturais como Corantes na Indústria Alimentícia. **Revista Virtual de Química**, 21 abr. 2013. 394-420. Disponível em: <<http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v5n3a05.pdf>>.
87. INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **INEP - ENEM**, 2019. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/guest/enem>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

88. ARANHA, M. L. D. A.; MARTINS, M. H. P. **FILOSOFANDO**: Introdução à Filosofia. 4ª. ed. São Paulo: Moderna, 2009.
89. CHALMERS, A. F. **O que é Ciência afinal?** Tradução de Raul Filker. [S.l.]: Editora Brasiliense, 1993.
90. CASTRO CORREIO, J. C.; CASTRO CORREIO, M. C. EPISTEME, SCIENTIA E CIÊNCIA: UMA TRAJETÓRIA. **Problemata - Revista Internacional de Filosofia**, 7, n. 2, out. 2016. 99-117.
91. SILVA, C. M. D. M. O conceito de doxa (opinião) em Aristóteles. **Linha D'Água**, São Paulo, 29, n. 2, dez. 2016. 43-67.
92. LOPES, A. R. C. Conhecimento Escolar: Processos de Seleção Cultural e de Mediação Didática. **Educação & Realidade**, 22, n. 1, 1997. 95-112.
93. DOMINGUINI, L. A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA COMO INTERMEDIADORA ENTRE O CONHECIMENTO CIENTÍFICO E O CONHECIMENTO ESCOLAR. **Revista Eletrônica de Ciências da Educação**, Campo Largo, 7, n. 2, nov. 2008. 1-16.
94. LOPES, A. R. C. CONHECIMENTO ESCOLAR EM QUÍMICA - PROCESSO DE MEDIAÇÃO DIDÁTICA DA CIÊNCIA. **QUÍMICA NOVA**, 27 jan. 1997. 563-568.
95. MELZER, E. E. M. **A TEORIAS DE CHEVALLARD E FLECK: RELAÇÕES ENTRE A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA E O TRÁFEGO DE PENSAMENTOS**. EDUCERE - PUCPR. Curitiba - PR, p. 460-474. 2015. (2176-1396).
96. JACQUES, C. Chevallard (Yves). — La Transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné. **Revue française de pédagogie**, 76, 1986. 89-91.
97. BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. SERÃO AS REGRAS DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA APLICÁVEIS AOS CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA? **Investigações em Ensino de Ciências**, 10, n. 3, 2005. 387-404.
98. OLDFIELD, J. D.; SHAW, D. J. B. V.I. Vernadsky and the noosphere concept: Russian understandings of society–nature interaction. **Geoforum**, 37, n. 1, jan. 2006. 145-154.
99. VERNADSKY, W. I. LA BIOSPHERE ET LA NOÖSPHERE. **American Scientist**, 33, n. 1, jan. 1945. 1-17.
100. BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do . conhecimento. Tradução de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
101. SWERDLOW, N. M. Thomas S. Kuhn, 1922–1996. **Biographical Memoirs - National Academy of Sciences**, 2013. 1-19. Disponível em: <<http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/kuhn-thomas.pdf>>.



- 102 KUHN, T. S. **O caminho desde A Estrutura: ensaios filosóficos, 1970-1993, com uma**  
. entrevista autobiográfica. Tradução de Cesar Mortari. São Paulo: Editora UNESP, 2006.
- 103 MENDONÇA, A. L. D. O. O legado de Thomas Kuhn após cinquenta anos. **Scientiae Studia**,  
. São Paulo, 10, n. 3, 2012. 535-560.
- 104 THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Thomas S. Kuhn. **Encyclopædia**  
. **Britannica**, 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Thomas-S-Kuhn>>. Acesso em: 21 abr. 2020.
- 105 MENDONÇA, A. L. D. O.; VIDEIRA, A. A. P. Progresso científico e incomensurabilidade em  
. Thomas Kuhn. **Scientiae Studia**, São Paulo, 5, n. 2, 2007. 169-183.
- 106 PACHOUMI, E. The Religious and Philosophical Assimilations of Helios in the Greek  
. Magical Papyri. **Greek Roman and Byzantine Studies**, 55, n. 2, 2015. 391-413.
- 107 TAKESHI, M. ORIGIN AND GROWTH OF WORSHIP OF AMATERASU. **Asian Folklore**  
. **Studies**, 37, n. 1, 1978. 1-11.
- 108 NODARI, A.; AMARAL, M. C. D. A. A questão (indígena) do Manifesto Antropófago.  
. **Revista Direito e Práxis**, Rio de Janeiro, 9, n. 4, out. 2018. 2461-2502.
- 109 THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Re. **Encyclopædia Britannica**, 2019.  
. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/Re>>. Acesso em: 2 jun 2020.
- 110 HART-DAVIS, A. (Ed.). **Science: The Definitive Visual Guide**. Londres: DK, 2016.  
.
- 111 RAYAN, S. Analogical reasoning roots in Ibn al-Haytham's scientific method of research.  
. **International Journal of Computational Bioinformatics and In Silico Modeling**, 3, n. 1,  
03 fev. 2014. 321-326.
- 112 WATSON, R. A. René Descartes. **Encyclopædia Britannica**, 2020. Disponível em:  
. <<https://www.britannica.com/biography/Rene-Descartes>>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- 113 WESTMAN, R. S. Johannes Kepler. **Encyclopædia Britannica**, 2020. Disponível em:  
. <<https://www.britannica.com/biography/Johannes-Kepler>>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- 114 DESCARTES, R. **Discurso do método & Ensaios**. Tradução de C. A. Battisti; E. Andrade, *et*  
. *al.* São Paulo: Editora Unesp, 2018.
- 115 WESTFALL, R. S. Isaac Newton. **Encyclopædia Britannica**, 2020. Disponível em:  
. <<https://www.britannica.com/biography/Isaac-Newton>>. Acesso em: 30 abr. 2020.
- 116 NEWTON, I. A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the  
. University of Cambridge; containing his new theory about light and colors: sent by the

author to the publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; in order to be communicated to the R. Soc. **Philosophical Transactions**, 6, n. 80, 19 fev. 1672. 3075–3087.

- 117 LEXICO POWERED BY OXFORD. Spectrum | Meaning of Spectrum. **Lexico**, 2020.  
. Disponível em: <<https://www.lexico.com/definition/spectrum>>. Acesso em: 01 maio 2020.
- 118 EUROPEAN SPACE AGENCY. Herschel at a glance. **ESA**. Disponível em:  
. <[http://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Herschel/Herschel\\_at\\_a\\_glance](http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Herschel/Herschel_at_a_glance)>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 119 FRERCKS, J.; WEBER, H.; WIESENFELDT, G. Reception and discovery: the nature of Johann Wilhelm Ritter's invisible rays. **Studies in History and Philosophy of Science**, 40, n. 2, 2009. 143–156.
- 120 MAXWELL, J. C. VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field. **Philosophical Transactions**, 155, 01 jan. 1865. 459–512.
- 121 COLÉGIO NACIONAL. Conteúdos que mais caem no Enem – Ciências da Natureza e suas Tecnologias. **G1**, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/especial-publicitario/colégio-nacional/mandando-bem-no-enem/noticia/2018/10/25/conteudos-que-mais-caem-no-enem-ciencias-da-natureza-e-suas-tecnologias.ghtml>>. Acesso em: 05 maio 2020.
- 122 FRAUNHOFER HHI. Biography of Heinrich Hertz. **Fraunhofer Institute for Telecommunications**, 2020. Disponível em:  
<<https://www.hhi.fraunhofer.de/en/fraunhofer-hhi/about-us/history-of-hhi/biography-of-heinrich-hertz.html>>. Acesso em: 06 maio 2020.
- 123 HERTZ, H. Ueber sehr schnelle electrische Schwingungen. **Annalen der Physik**, 267, n. 7, 1887. 421-448.
- 124 HERTZ, H. Ueber electrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion. **Annalen der Physik**, 270, n. 8A, 1888. 609-623.
- 125 BIPM. Time and frequency: SI unit of time (second). **Bureau International de Poids et Mesures**, 2018. Disponível em: <<https://www.bipm.org/metrology/time-frequency/units.html>>. Acesso em: 06 maio 2020.
- 126 BERGIA, S. Augusto Righi. **Scienzagiovane - Bologna University web site for Science Communication**, 2013. Disponível em:  
<<http://www.scienzagiovane.unibo.it/scienziati/righi-1.html>>. Acesso em: 06 maio 2020.
- 127 PV. L'Ottica delle Oscillazioni Elettriche. **Nature**, 56, 1897. 125.

- 128 EUROPEAN SPACE AGENCY. Cosmology: First stars were born much later than thought. . **ScienceDaily**, 2015. Disponível em:  
 . <<https://www.sciencedaily.com/releases/2015/02/150205131233.htm>>. Acesso em: 07 maio 2020.
- 129 NOBEL MEDIA. The Nobel Prize in Physics 1978. **The Nobel Prize**. Disponível em:  
 . <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1978/summary/>>. Acesso em: 06 maio 2020.
- 130 RÖNTGEN, W. C. Ueber eine neue Art von Strahlen. **Annalen der Physik**, 300, n. 1, 1895.  
 . 12-17.
- 131 PASSOS, M. H. D. S.; DE SOUZA, A. A. **Química Nuclear e Radioatividade**. 2ª. ed.  
 . Campinas: Editora Átomo, 2012.
- 132 NOBEL MEDIA. Wilhelm Conrad Röntgen - Biographical. **The Nobel Prize**. Disponível em:  
 . <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/biographical/>>. Acesso em:  
 06 maio 2020.
- 133 CORISH, J.; ROSENBLATT, G. M. Name and symbol of the element with atomic number  
 . 111 (IUPAC Recommendations 2004). **Pure and Applied Chemistry**, 76, n. 12, 01 jan.  
 2009. 2101-2103.
- 134 GERWARD, L. Paul Villard and his Discovery of Gamma Rays. **Physics in Perspective**, n. 1,  
 . 1999. 367–383.
- 135 KHAN ACADEMY. Luz e pigmentos fotossintéticos. **Khan Academy**. Disponível em:  
 . <<https://pt.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>>. Acesso em: 07 maio 2020.
- 136 LEVINE, I. N. **Quantum Chemistry**. 4th. ed. London: Prentice Hall, 1991.  
 .
- 137 LEVINE, I. N. **Físico-Química**. Tradução de Edilson Clemente Silva e Oswaldo Esteves  
 . Barcia. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2012.
- 138 STUEWER, R. H. Max Planck. **Encyclopædia Britannica**, 2020. Disponível em:  
 . <<https://www.britannica.com/biography/Max-Planck>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- 139 GRIFFITHS, D. **INTRODUCTION TO ELEMENTARY PARTICLES**. 1ª. ed. [S.l.]: Wiley, 1987.  
 .
- 140 HOLLAS, J. M. **Modern Spectroscopy**. 4ª. ed. [S.l.]: Wiley, 2004.  
 .

- 141 LEXICO POWERED BY OXFORD. - Scopy | Definition of - Scopy. **Lexico**, 2020. Disponível em: <<https://www.lexico.com/definition/-scopy>>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- 142 SMENTEK, L. Different sides of the Jabłoński Diagram on its 75th anniversary. **Newsletter of the Forum on International Physics - American Physical Society**, jun 2009. 1-10.
- 143 JABLONSKI, A. Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes. **Nature**, 10 jun 1933. 839-840.
- 144 HIRAI, K.; ITOH, T.; TOMIOKA, H. Persistent Triplet Carbenes. **Chemical Reviews**, 109, n. 8, 2009. 3275–3332.
- 145 PLATZ, M. S. (Ed.). **Kinetics and Spectroscopy of Carbenes and Biradicals**. 1ª. ed. [S.l.]: Springer, 1990.
- 146 THE CMS COLLABORATION. Evidence for the direct decay of the 125 GeV Higgs boson to fermions. **Nature Physics**, 10, 2014. 557–560.
- 147 CHAKRABORTY, D.; KONIGSBERG, J.; RAINWATER, D. Top-Quark Physics. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, 53, 2003. 301-351.
- 148 ROTH, H. D. The Beginnings of Organic Photochemistry. **Angewandte Chemie International Edition**, 28, n. 9, set. 1989. 1193-1207.
- 149 ROTH, H. D. Twentieth century developments in photochemistry. Brief historical sketches. **Pure and Applied Chemistry**, 73, n. 3, 2001. 395–403.
- 150 OELGEMÖLLER, M. Solar Photochemical Synthesis: From the Beginnings of Organic Photochemistry to the Solar Manufacturing of Commodity Chemicals. **Chemical Reviews**, 116, n. 17, 2016. 9664–9682.
- 151 CIAMICIAN, G. The Photochemistry of the Future. **Science**, 36, n. 926, 27 set. 1912. 385-394.
- 152 VENTURI, M.; BALZANI, V.; GANDOLFI, M. T. **FUELS FROM SOLAR ENERGY. A DREAM OF GIACOMO CIAMICIAN, THE FATHER OF PHOTOCHEMISTRY**. Solar World Congress. Orlando, Florida USA - August 6-12, 2005: American Solar Energy Society. 2005.
- 153 LEWIS, G. N. The Conservation of Photons. **Nature**, 1926. 874-875.
- 154 HILDEBRAND, J. H. Gilbert Newton Lewis, 1875–1946. **Biographical Memoirs - National Academy of Sciences**, 1958. 210-235.
- 155 MCCLURE, D. S. Michael Kasha, 1920–2013. **Biographical Memoirs - National Academy of Sciences**, 2015. 1-13.

- 156 LEWIS, G. N.; KASHA, M. Phosphorescence and the Triplet State. **Journal of the American Chemical Society**, 66, n. 12, 1944. 2100–2116.
- 157 LEWIS, G. N.; LIPKIN, D.; MAGEL, T. T. Reversible Photochemical Processes in Rigid Media. A Study of the Phosphorescent State. **Journal of the American Chemical Society**, 63, n. 11, 1941. 3005-3018.
- 158 KASHA, M. Characterization of electronic transitions in complex molecules. **Discussions of the Faraday Society**, 9, 1950. 14-19.
- 159 VALEUR, B.; BROCHON, J.-C. (Eds.). **New Trends in Fluorescence Spectroscopy**. 1<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Springer, 2001.
- 160 NOBEL MEDIA AB 2020. The Nobel Prize in Chemistry 1967. **NobelPrize.org**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1967/summary/>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- 161 NOBEL MEDIA AB 2020. Ronald G.W. Norrish – Biographical. **NobelPrize.org**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1967/norrish/biographical/>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- 162 FREDERICK SYDNEY, D.; BRIAN ARTHUR, T. Ronald George Wreyford Norrish, 9 November 1897 - 7 June 1978. **Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society**, 27, 1981. 379-424.
- 163 PAULSON, S. E. et al. Photolysis of Heptanal. **The Journal of Organic Chemistry**, 71, n. 17, 2006. 6403-6408.
- 164 RENATA, H.; ZHOU, Q.; BARAN, P. S. Strategic Redox Relay Enables A Scalable Synthesis of Ouabagenin, A Bioactive Cardenolide. **Science**, 339, n. 6115, 2013. 59-63.
- 165 OELGEMÖLLER, M.; HOFFMANN, N. Studies in organic and physical photochemistry – an interdisciplinary approach. **Organic & Biomolecular Chemistry**, n. 14, 2016. 7392-7442.
- 166 NOBEL MEDIA AB 2020. George Porter – Biographical. **NobelPrize.org**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1967/porter/biographical/>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- 167 FLEMING, G. R.; PHILLIPS, D. George Porter KT OM, Lord Porter of Luddenham. 6 December 1920 – 31 August 2002. **Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society**, 50, 2004. 257-283.
- 168 LAKOWICZ, J. R. **Principles of Fluorescence Spectroscopy**. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Springer, 2006.

- 169 KRAMER, H. E. A.; FISCHER, P. The Scientific Work of Theodor Förster: A Brief Sketch of his Life and Personality. **ChemPhysChem**, 12, n. 3, 2010. 555-558.
- 170 KLEE, E. **Das Personenlexikon zum Dritten Reich: Wer war was vor und nach 1945?** [S.l.]: S. Fischer Verlag, 2003. 158 p.
- 171 WEISS, R. G.; WAMSER, C. C. Introduction to the Special Issue in honour of George Simms Hammond. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 5, n. 10, 2006. 869-870.
- 172 RAMAMURTHY, V.; MATTAY, J. Nicholas J. Turro (1938– 2012). **Angewandte Chemie International Edition**, 52, n. 5, 2013. 1363-1364.
- 173 BOHNE, C.; JOHNSTON, L. J.; LEIGH, W. J. Introduction to the Special Issue in Honor of J. C. (Tito) Scaiano. **Photochemistry and Photobiology**, 82, n. 1, 2006. 1-4.
- 174 LEIGH, W. J.; WORKENTIN, M. S. Tribute / Hommage. **Canadian Journal of Chemistry**, 89, n. 2, 2011. 11-14.
- 175 NEUMANN, M. G.; QUINA, F. H. A FOTOQUÍMICA NO BRASIL. **Química Nova**, 25, n. 1, 2002. 34-38.
- 176 NEUMANN, M. G.; SCHMITT, C. C. A FOTOQUÍMICA BÁSICA E APLICADA NO BRASIL DURANTE OS ÚLTIMOS 40 ANOS. **Química Nova**, 40, n. 6, 2017. 675-679.
- 177 MENDES, V. Filha de Prestes e Olga terá indenização de R\$ 100 mil. **O Estado de S. Paulo**, 2004. Disponível em: <<https://politica.estadao.com.br/noticias/geral,filha-de-prestes-e-olga-benario-sera-indenizada-pelo-governo,20040824p37600>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 178 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Anita Leocadia Prestes). **Currículo Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/9123702879001302>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 179 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Ricardo Bicca de Alencastro). **Currículo Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/3981568451860330>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 180 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Warner Bruce Kover). **Currículo Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/7039173046498634>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 181 INSTITUTO DE QUÍMICA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Teses e Dissertações 1974. **Instituto de Química - UFRJ**, 2020. Disponível em: <[https://www.iq.ufrj.br/posgrad\\_old/informacoes/teses-e-dissertacoes-1974/](https://www.iq.ufrj.br/posgrad_old/informacoes/teses-e-dissertacoes-1974/)>. Acesso em: 28 jul. 2020.

- 182 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Aurelio Baird Buarque Ferreira).  
. **Currículo Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/5526484175547597>>.  
Acesso em: 28 jul. 2020.
- 183 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (David Ernest Nicodem). **Currículo**  
. **Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/6847860144256948>>. Acesso em: 28  
jul. 2020.
- 184 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Jose Carlos Netto Ferreira). **Currículo**  
. **Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/2496613154167269>>. Acesso em: 28  
jul. 2020.
- 185 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Nanci Camara de Lucas Garden).  
. **Currículo Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/6151842378756869>>.  
Acesso em: 28 jul. 2020.
- 186 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Rodrigo Jose Correa). **Currículo Lattes**,  
. 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/9359368411913637>>. Acesso em: 28 jul.  
2020.
- 187 CNPQ. Currículo do Sistema de Currículos Lattes (Josué Sebastián Bello Forero). **Currículo**  
. **Lattes**, 2020. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/7698122702484235>>. Acesso em: 28  
jul. 2020.
- 188 INSTITUTO DE QUÍMICA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Licenciatura em  
. Química. **Instituto de Química - UFRJ**, 2020. Disponível em:  
<<https://www.iq.ufrj.br/graduacao/licenciatura/>>. Acesso em: 30 jul. 2020.
- 189 GOÉS, M. C. R.; SMOLKA, A. L. B. **A significação nos espaços educacionais: interação**  
. social e subjetivação. Campinas: Papirus, 1997.
- 190 CUNHA, R. B. Alfabetização científica ou letramento científico?: interesses envolvidos nas  
. interpretações da noção de scientific literacy. **Revista Brasileira de Educação**, 22, n. 68,  
2017. 169-186.
- 191 OECD. **PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do**. OECD  
. Publishing. Paris. 2020.
- 192 OECD. Data - PISA. **OECD**, 2020. Disponível em: <<https://www.oecd.org/pisa/data/>>.  
. Acesso em: 11 ago. 2020.
- 193 INEP - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **RELATÓRIO BRASIL NO PISA 2018**. Instituto Nacional  
. de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Brasília. 2019.
- 194 VERHOEVEN, J. W. Glossary of terms used in photochemistry (IUPAC Recommendations  
. 1996). **Pure and Applied Chemistry**, 68, n. 12, 1996. 2223-2286.

## 9. APÊNDICE



### QUESTIONÁRIO SOBRE FUNDAMENTOS DE FOTOQUÍMICA

1. Em que período da graduação você se encontra? \_\_\_\_\_
2. Você já ouviu falar sobre Fotoquímica?  
( ) sim  
( ) não
3. Abaixo se encontram alguns assuntos estudados em Fotoquímica, assinale apenas os itens que você já ouviu falar.

<input type="checkbox"/> FÓTONS	<input type="checkbox"/> SUPERFÍCIES DE ENERGIA POTENCIAL
<input type="checkbox"/> ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	<input type="checkbox"/> TRANSIÇÕES ELETRÔNICAS
<input type="checkbox"/> REAÇÕES FOTOQUÍMICAS	<input type="checkbox"/> PRINCÍPIO DE FRANCK-CONDON
<input type="checkbox"/> FLUORESCÊNCIA	<input type="checkbox"/> DESVIO DE STOKES
<input type="checkbox"/> FOSFORESCÊNCIA	<input type="checkbox"/> DIAGRAMA DE JABLOSKI
<input type="checkbox"/> QUIMIOLUMINESCÊNCIA	<input type="checkbox"/> RENDIMENTO QUÂNTICO
<input type="checkbox"/> BIOLUMINESCÊNCIA	<input type="checkbox"/> ESTADOS EXCITADOS
<input type="checkbox"/> LÂMPADAS, LEDs e LASER	<input type="checkbox"/> ESTADO SINGLETE
<input type="checkbox"/> CÉLULAS SOLARES	<input type="checkbox"/> ESTADO TRIPLETE
<input type="checkbox"/> CORANTES	<input type="checkbox"/> EXCÍMEROS E EXCÍPLEXOS
<input type="checkbox"/> FOTOSSÍNTESE	<input type="checkbox"/> FOTOBIOLOGIA
<input type="checkbox"/> FOTOCATALISE	<input type="checkbox"/> TERAPIA FOTODINÂMICA
<input type="checkbox"/> ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO	<input type="checkbox"/> CONES E BASTONETES
<input type="checkbox"/> ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO	<input type="checkbox"/> REAÇÃO DE NORRISH
<input type="checkbox"/> FOTOTOXICIDADE	<input type="checkbox"/> REAÇÕES PERICÍCLICAS
<input type="checkbox"/> FOTOESTABILIDADE	<input type="checkbox"/> FOTÓLISE

4. Você acha que a Fotoquímica está presente de alguma maneira em seu cotidiano? Se sim, por favor, cite alguns exemplos.

---

---

---

---

5. Uma vez no estado excitado, uma molécula pode realizar diversos fenômenos, você saberia citar alguns?

---

---

---

---

Apêndice A. Primeira página do questionário elaborado.



6. Se uma roupa branca for pintada com um corante cujo máximo no espectro de absorção é no comprimento de onda 610nm (laranja no espectro eletromagnético), a roupa terá a seguinte cor:

Laranja  
Vermelho  
Rosa  
Violeta  
Azul  
Ciano  
Verde  
Amarelo



7. Complete as frases a seguir:

- a) Um objeto que absorve todos os comprimentos de onda do espectro visível (400-700nm) possui cor \_\_\_\_\_.
- b) Um objeto que reflete todos os comprimentos de onda do espectro visível (400-700nm) possui cor \_\_\_\_\_.
- c) Um objeto que absorve a região verde do espectro visível (500-550nm) possui cor \_\_\_\_\_.
- d) Um objeto que absorve a região violeta do espectro visível (400-450nm) possui cor \_\_\_\_\_.

8. A matéria interage de formas diferentes com cada tipo de radiação eletromagnética. Sabendo disso, correlacione os fenômenos a seguir com cada região do espectro eletromagnético responsável por eles.

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| a) Ultravioleta e visível | ( ) Transição eletrônica de elétrons de valência       |
| b) Ondas de rádio         | ( ) Estiramentos e dobramentos de ligações químicas    |
| c) Infravermelho          | ( ) Transição eletrônica de elétrons de camada interna |
| d) Raios X                | ( ) Transições nucleares                               |
| e) Micro-ondas            | ( ) Rotação molecular                                  |
| f) Raios                  | ( ) Mudança de spin                                    |

9. Assinale a estrutura biológica em nossos olhos responsável pelo fenômeno da visão?

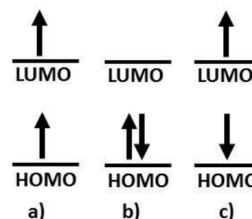
- a) Pupila  
b) Íris  
c) Cristalino  
d) Nervo Óptico  
e) Cones e Bastonetes

10. Correlacione os diagramas de orbital molecular *HOMO-LUMO* de uma molécula orgânica genérica comum a seguir com os seus respectivos estados.

Estado Singlete Fundamental ( $S_0$ ): \_\_\_\_\_

Estado Singlete Excitado ( $S_1$ ): \_\_\_\_\_

Estado Triplete Excitado ( $T_1$ ): \_\_\_\_\_



Apêndice B. Segunda página do questionário elaborado.

11. Defina o que é fluorescência, o que é fosforescência e qual é a diferença entre os dois fenômenos.

---

---

---

---

---

---

---

12. Qual é a diferença entre uma lâmpada incandescente, uma lâmpada fluorescente, um LED e um LASER?

---

---

---

---

---

---

---

---

13. Sabe-se que há uma relação entre o excesso de exposição à luz solar e o surgimento de cânceres de pele. Explique de que forma a radiação eletromagnética provoca danos no DNA e diga qual a região do espectro eletromagnético é a responsável por estes danos.

---

---

---

---

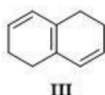
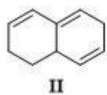
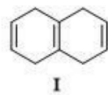
---

---

---

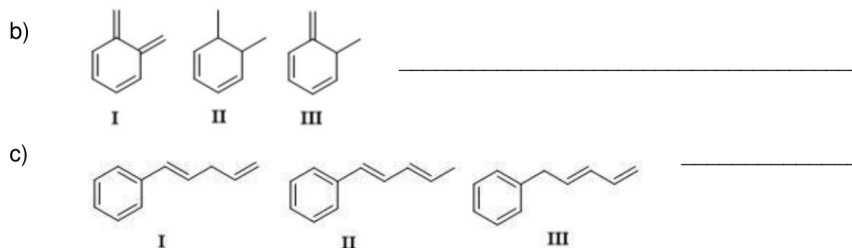
14. Organize as moléculas (indicadas por I, II e III em cada item) conforme onde você esperaria encontrar seu comprimento de onda de absorção máximo, em um espectro de absorção UV-Vis, do menor para o maior comprimento de onda.

a)



\_\_\_\_\_

Apêndice C. Terceira página do questionário elaborado.



15. Apesar de estar presente em diversos aspectos de nosso cotidiano, a Fotoquímica e as interações entre a luz e a matéria são pouco abordadas no ensino básico no Brasil. Você acha que conceitos básicos de fotoquímica e de interação luz-matéria deveriam fazer parte do currículo da educação básica e serem ensinados no ensino médio?
- ( ) sim  
( ) não
16. Você acha importante professores de Química aprenderem em sua formação na graduação conceitos básicos de Fotoquímica e interação luz-matéria?
- ( ) sim  
( ) não
17. Com a implementação da Base Nacional Comum Curricular, assuntos acerca da interação entre a matéria e a radiação eletromagnética serão incorporados ao currículo da educação básica brasileira. Você julga que a sua formação, até agora, foi adequada em fornecer a bagagem teórica de fotoquímica e espectroscopia necessária para dar aulas que abordem fundamentos de interação entre a luz e a matéria?
- ( ) sim  
( ) não

Apêndice D. Quarta página do questionário elaborado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza  
Instituto de Química



TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Prezado participante,

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa **"Avaliação da formação docente em Química e proposta de mediação didática de conceitos de Fotoquímica para o ensino de interação entre a luz e a matéria"** desenvolvida por **João Victor Lopes da Silva Néto**, discente de Licenciatura em Química, sob orientação da Professora Dr<sup>a</sup> **Nanci Câmara de Lucas Garden**.

1. **Natureza da pesquisa:** *Você está sendo convidado(a) a participar desta pesquisa que tem como finalidade analisar a percepção dos alunos de graduação sobre os temas que envolvem interação luz-matéria / fotoquímica.*
2. **Participantes da pesquisa:** *Participarão da pesquisa alunos de diferentes períodos do curso de Licenciatura em Química.*
3. **Envolvimento na pesquisa:** *Sua participação é voluntária, isto é, ela não é obrigatória e você tem plena autonomia para decidir se quer ou não participar. Você não será penalizado de nenhuma maneira caso decida não consentir sua participação. Contudo, ela é muito importante para a execução da pesquisa.*
4. **Sobre a pesquisa:** *A sua participação consistirá em responder perguntas do questionário apresentado, também poderá manifestar sua opinião ou observação no verso da pesquisa. Suas respostas serão armazenadas, em arquivos digitais e físico, mas somente terão acesso às mesmas o pesquisador e seus orientadores. Ao final da pesquisa, todo material será mantido em arquivo por pelo menos 5 anos, conforme Resolução 466/2012. Os resultados serão divulgados em artigos científicos e na monografia.*
5. **Riscos e desconforto:** *A participação nesta pesquisa não traz complicações legais. Os procedimentos adotados nesta pesquisa obedecem aos Critérios de Ética em Pesquisa com Seres Humanos conforme Resolução nº 196/96 do Conselho Nacional de Saúde. Nenhum dos procedimentos usados oferece riscos à sua dignidade.*
6. **Confidencialidade:** *Todas as informações coletadas neste estudo são estritamente confidenciais. Qualquer dado que possa identificá-lo será omitido na divulgação dos resultados da pesquisa e o material armazenado em local seguro.*
7. **Benefícios:** *Ao participar desta pesquisa você não terá nenhum benefício direto. Entretanto, esperamos que este estudo forneça informações importantes a respeito da compreensão dos participantes sobre temas relacionados à interação entre a matéria e a radiação eletromagnética, de forma que o conhecimento que será construído a partir desta pesquisa possa auxiliar a pesquisadores, professores e futuros professores a entender qual o nível de compreensão atual dos alunos nesta temática e também que possa auxiliar no desenvolvimento de novos materiais didáticos e no aprimoramento do currículo.*

Apêndice E. Frente do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido entregue aos participantes da pesquisa.

*O pesquisador se compromete em divulgar os resultados obtidos com a finalidade de contribuir com informações importantes que devam acrescentar elementos importantes à literatura.*

8. **Pagamento:** Não haverá nenhum tipo de despesa para participar desta pesquisa, bem como nada será pago por sua participação.

Após estes esclarecimentos, solicitamos o seu consentimento de forma livre para participar desta pesquisa. Portanto preencha, por favor, os itens que se seguem.

Observação: Não assine esse termo se ainda tiver dúvida a respeito.

**Contato com o pesquisador: João Victor Lopes da Silva Néto**

**Telefone: (21) 99748-7788**

**e-mail: joaovictorsn.98@gmail.com**

#### **Consentimento Livre e Esclarecido**

Eu, \_\_\_\_\_, CPF \_\_\_\_\_ autorizo e concedo o direito de utilização dos dados, que constitui o projeto de conclusão de curso, em Licenciatura em Química, cujo título provisório é **Avaliação da formação docente em Química e proposta de mediação didática de conceitos de Fotoquímica para o ensino de interação entre a luz e a matéria**, desenvolvido pelo aluno de graduação do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) **João Victor Lopes da Silva Néto** e orientado pela Professora Dr.<sup>a</sup> **Nanci Câmara de Lucas Garden** (IQ/UFRJ) e pelo aluno de doutorado **Rodolfo Inêz Teixeira** (PGQu – IQ/UFRJ):

- a) Para fins pedagógicos;
- b) Para fins acadêmico-científicos (projetos de pesquisa, extensão e intervenção);
- c) Por outros pesquisadores e/ou professores da UFRJ ou outra instituição que foram autorizados pela Universidade a realizar projetos científico-acadêmicos;
- d) Para fins de divulgação do trabalho e/ou da UFRJ (informativos, encartes, folders, jornais internos da universidade e/ou semelhantes, congressos);
- e) A presente autorização é firmada em caráter gratuito, irretratável, irrevogável e por prazo indeterminado.

Tendo em vista os itens acima apresentados, eu, de forma livre e esclarecida, manifesto meu consentimento em participar da pesquisa. Declaro que autorizo a realização da pesquisa e a divulgação dos dados obtidos neste estudo. Neste documento constam ambas as assinaturas, a minha e a do pesquisador.

Rio de Janeiro, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Participante da Pesquisa

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Pesquisador

Apêndice F. Verso do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido entregue aos participantes da pesquisa.

Tabela A 1. Respostas dos alunos à questão 4.

<b>Respostas à questão 4</b>	<b>Período</b>
"Lâmpadas em geral; aparelhos de microondas; exames de raio x; interruptores que brilham no escuro"	<b>1</b>
"Sim, lâmpadas, TVs etc"	<b>1</b>
"Fogos de artifício"	<b>1</b>
"Sim, na luz, lâmpadas, em placas solares."	<b>1</b>
"Não sei nada sobre o assunto, mas pelas alternativas anteriores me faz pensar que a área da química em que estuda os fótons e sua interação com a matéria, tanto em questão reacional (transformação da matéria) quanto em questão de caracterização (identificação das moléculas)."	<b>1</b>
"Sim, um dos exemplos pode ser visto como no uso diário de LEDs, lâmpadas e qualquer uma dessas tecnologias."	<b>1</b>
"Sim, lâmpadas, animais que emitem luz como os vagalumes, fogos de artifício. "	<b>1</b>
"Sim. A nossa visão é parte de uma reação fotoquímica e grande parte do oxigênio que respiramos vem da fotossíntese das algas marinhas."	<b>1</b>
"Sim. No protetor solar e fotossíntese por exemplo."	<b>1</b>
"Sim, nas lâmpadas fluorescentes, na presença de luz e entre outros."	<b>1</b>
"Sim, a visão por exemplo, resulta de reações fotoquímicas nos cones e bastonetes."	<b>2</b>
"Sim, nas lâmpadas e aparelhos."	<b>2</b>
"Exemplo as lâmpadas, células solares."	<b>2</b>
"Sim, na nossa visão."	<b>3</b>
"Sim, na fotossíntese das plantas, nas lâmpadas em casa, dentre outros."	<b>4</b>
"Sim, na presença em lâmpadas, fogos de artifício, na fotossíntese das plantas."	<b>4</b>
"Sim."	<b>4</b>
"Sim. Fotossíntese."	<b>5</b>
"Sim. Lâmpadas, painéis solares."	<b>5</b>
"Sim! Somos rodeados por tecnologias da área como LEDs e células fotovoltaicas."	<b>5</b>
"Sim. Nas cores que vemos, na fotossíntese das plantas, nas luzes que acendemos."	<b>5</b>
"Sim. Protetor solar, bases de maquiagem."	<b>6</b>
"Nas luzes, cores de roupas etc."	<b>6</b>

"Fotoquímica está presente nas lâmpadas fluorescentes, interruptores que apresentam fluorescência, no metabolismo das plantas e em diversos fatores nocivos como luz UV causando câncer de pele."	<b>6</b>
"Sim. A tinta da caneta de quadro branco apresenta uma cor diferente quando bate. Alguns interruptores de luz brilham no escuro depois que a luz se apaga. O sabão em pó tem alguma coisa azul que deixa o branco mais branco. As roupas coloridas desbotam quando secam ao Sol. A fotossíntese das plantas. Quando ficamos um tempo em ambiente iluminado com luz verde, ao sair dele, enxergamos o mundo rosa."	<b>6</b>
"Sim, a fotossíntese."	<b>6</b>
"Não consigo visualizar os conceitos de fotoquímica em muitos exemplos no meu cotidiano, alguns que consigo associar é a fotossíntese, a interação com as microondas no uso doméstico."	<b>7</b>
"A partir do momento que damos energia (excitamos) um elétron, ele irá emitir fóton, como nos fogos de artifício por exemplo."	<b>8</b>
"Sim, na fotossíntese das plantas, na percepção das cores e na iluminação de ambientes e cidades."	<b>8</b>
"Sim, o exemplo clássico que se tem é a fotossíntese. Além disso temos placas de trânsito, que se utilizam da fluorescência, para auxiliar os motoristas a noite."	<b>8</b>
"Sim, desde as lâmpadas e LEDs até telas como OLEDs."	<b>9</b>
"Lâmpadas, objetos fluorescentes, protetor solar, nas cores, nos vagalumes, na luz como um todo."	<b>9</b>
"Sim, em lâmpadas, LED e lasers."	<b>9</b>
"Sim, a exemplo disso tem-se as lâmpadas (acima citadas), o uso de corantes."	<b>9</b>
"Sim. Fotossíntese, lâmpadas, aparelhos eletrônicos."	<b>10</b>
"Eu acho que a fotoquímica está presente no cotidiano. Duas relações que já ouvi sobre a fotoquímica é com a fotossíntese e a fotografia."	<b>11</b>
"Sim, bronzeamento, lâmpadas, fotossíntese, fotólise (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )."	<b>11</b>
"Sim, ela está presente! A Fotoquímica está presente na síntese de vitamina D, na regularização do ciclo circadiano, em processos de fotoenvelhecimento e de câncer de pele, etc."	<b>12</b>
"Lâmpadas, LED. Aparelhos para medição de absorção de luz (espectrofotômetro), informática em geral, televisão, celular, fotografia digital."	<b>12</b>

"Sim, está presente na ação da vitamina D pela luz solar, em lâmpadas e telas de produtos eletrônicos, cosméticos com propriedades fluorescentes, etc."	<b>12</b>
"Sim. Na lâmpada que eu utilizo, na fluorescência de vagalumes."	<b>13</b>
"Sim. Na fotossíntese realizada pelas plantas, na degradação de obras de arte e medicamentos quando expostos à luz; no tênis Yeezy fosforescente e nas estrelas para decoração de teto; na bioluminescência dos vagalumes; na energia solar, entre outras."	<b>14</b>
"Não sei."	<b>14</b>

Tabela A 2. Respostas dos alunos à questão 5.

<b>Respostas à questão 5</b>	<b>Período</b>
"Liberar energia em forma de luz/calor."	<b>1</b>
"Emitir fótons quando os elétrons "pularem de um lado pro outro."	<b>1</b>
"Maiores números de ligações, absorve energia quando há liberação, emite luz, fenômeno que realiza a luz dos fogos de artifício."	<b>1</b>
"Emissão de luz."	<b>1</b>
"Não tenho a menor ideia."	<b>1</b>
"Radiação, emissão de luz."	<b>1</b>
"Emissão de energia."	<b>1</b>
"Não sei."	<b>1</b>
"Emitir radiação ou entrar no estado de plasma."	<b>1</b>
"Não."	<b>1</b>
"Não."	<b>1</b>
"Emissão de luz no espectro visível."	<b>1</b>
"Não."	<b>2</b>
"Não!"	<b>2</b>
"Ela pode liberar luz em forma de energia."	<b>3</b>
"Mudança de cor de metais de transição quando formam complexos."	<b>4</b>
"Emitir luz, mudança de cor."	<b>4</b>
"Emissão de luz, emissão de energia..."	<b>4</b>
"Expansão de orbitais."	<b>5</b>
"Fluorescência, fosforescência."	<b>5</b>
" "Rotação" de ligações duplas, emissões luminosas."	<b>5</b>
"Fluorescência e fosforescência."	<b>5</b>



"Sim (bom, eu acho). Fluorescência e fosforescência."	6
"Rotação de ligações s, aumento das vibrações das ligações químicas e dependendo do comprimento de onda incidido pode até haver quebra de ligações."	6
"Ela volta ao seu estado fundamental emitindo radiação eletromagnética, que pode estar na região da luz visível, apresentando alguma cor, ou fora dela, emitindo ondas de rádio, microondas, IV, UV, etc."	6
"Ela pode retornar ao seu estado fundamental e emitir fótons."	6
"Não."	7
"Apenas emissão fóton."	8
"Retornar ao estado fundamental liberando energia sob a forma de luz visível."	8
"Voltar para o estado fundamental, liberando energia em forma de fóton."	8
"Fosforescência, fluorescência, reações e catálise com as moléculas em estado excitado, emissão de luz."	9
"Liberar fótons voltando ao estado fundamental, de mesmo ou diferente comprimento de onda, instantânea ou demoradamente."	9
"Fosforescência, bioluminescência, interações moleculares, dissociação e etc."	9
"Fluorescência; fosforescência."	9
"Maior reatividade. Ao retornar para o estado fundamental libera energia."	10
"Sem estudar ou pelo menos ler fica difícil responder de imediato."	11
"Sim, ocorrem fenômenos como liberação de energia em específicos comprimentos de onda do espectro eletromagnético, ex: fosforescência e fluorescência."	11
"Fluorescer, fosforescer, cruzamento intersistema e decaimento térmico."	12
"Liberação de energia, que pode ser por luminescência, fosforescência ou térmica."	12
"Sim, fluorescência, fosforescência, etc."	12
"Não."	13
"Voltar para um nível mais baixo de energia, liberando luz durante o processo."	14
"Não sei."	14

Tabela A 3. Respostas dos alunos à questão 11.

<b>Respostas à questão 11</b>	<b>Período</b>
"Ambos possuem efeitos luminosos, porém os elementos envolvidos e a maneira que se comportam são diferentes. Fluorescência - Flúor (F), Fosforescência - (P)."	1

"Fluorescência vem de um corpo com quantidades elevadas de flúor e fosforescência de fósforo."	<b>1</b>
"Emissão de radiação no espectro visível de onda causados respectivamente pelo flúor e fósforo."	<b>1</b>
"A fluorescência precisa de energia para que ocorra a reação química, já a fosforescência ocorre a reação sem precisar de energia."	<b>1</b>
"Não sei a definição, só escutei falar."	<b>3</b>
"Fluorescência é uma emissão luminosa rápida, momentânea, após a excitação de uma molécula. Fosforescência é uma emissão luminosa mais longa, persistente, após certo estímulo ou excitação. "	<b>5</b>
"Fluorescência é quando o elétron no seu estado excitado migra para um nível maior de energia com o mesmo spin que havia no estado fundamental. Enquanto na fosforescência o elétron no seu estado excitado migra para um nível maior de energia com spin oposto do que o seu estado fundamental."	<b>6</b>
"Eu sei que um deles continua brilhando ao cessar a fonte de energia e o outro cessa o brilho."	<b>6</b>
"Fluorescência é a emissão de luz de um objeto quando se incide alguma radiação sobre ele. Quando a radiação acaba, a emissão de luz também acaba. Já na fosforescência, o objeto continua a emitir luz mesmo quando não está mais sendo iluminado."	<b>6</b>
"Não sei explicar a diferença."	<b>6</b>
"A fluorescência ocorre quando o elétron retorna de um nível orbital mais energético para outro menos energético liberando um fóton, quanto a fosforescência não conheço o suficiente para defini-la e diferenciá-la da fosforescência."	<b>7</b>
"A fluorescência é quando absorve uma quantidade de energia e emite luz enquanto há o fornecimento, a fosforescência continua emitindo mesmo depois de estar algum tempo sem absorver energia."	<b>8</b>
"Os dois fenômenos são casos de luminescência. Fluorescência -> quando uma substância absorve radiação e depois emite essa energia sob a forma de luz visível, porém somente enquanto a fonte de radiação é efetiva. Fosforescência -> o mesmo processo do fenômeno acima, mas quando a fonte de radiação cessa, a substância continua a emitir luz."	<b>8</b>

"Fluorescência é a emissão de luz devido ao retorno do elétron para o estado fundamental, liberando fóton em tempo muito curto. A fosforescência é a mesma coisa só que com um tempo maior."	8
"Em ambas o comprimento de onda emitido por uma espécie do estado excitado ao fundamental é diferente do l absorvido que o excitou. Na fluorescência essa emissão é praticamente instantânea à pausa na fonte. Já na fosforescência o tempo de emissão será maior, resultando na aparente "reserva" daquela energia (tal como em objetos e camisas que "brilham" no escuro)."	9
"Fluorescência - quando substâncias emitem luz ao receber energia de uma fonte externa. Quando essa energia para/acaba, esse processo é parado. É o que ocorre com a lâmpada branca. Fosforescência -"	11
"Fluorescência é a emissão de luz de um estado singlete excitado para um estado singlete fundamental. Fosforescência é a emissão de luz de um estado triplete (T1) para o estado singlete fundamental (S0). A diferença é que a fosforescência apresenta decaimento com maior tempo de vida."	12
"A fosforescência é a liberação lenta e gradual de energia quando o elétron vai do estado excitado para o seu estado fundamental, passando por estados intermediários entre esses dois extremos. A fluorescência é a emissão de luz instantânea devido a interação com uma fonte de excitação. O objeto fluorescente deixa de emitir luz quando cessa a fonte de energia, já o fosforescente continua emitindo luz gradualmente."	12
"Fluorescência - Quando uma substância ou objeto emite luz ao ser exposto a radiação, pois há excitação do elétron e quando ele volta ao seu estado fundamental emite energia. Na fosforescência ocorre o mesmo fenômeno, porém ao voltar ao estado fundamental muda a orientação do spin, assim a fosforescência dura um pouco mais que a fluorescência."	12
"Fluorescência e fosforescência são propriedades que alguns materiais possuem por emitirem luz após absorverem energia. A diferença é que na fluorescência quando o fornecimento de energia acaba, a emissão de luz para instantaneamente e na fosforescência a emissão de luz pode durar por horas após a interrupção do fornecimento de energia."	14

Tabela A 4. Respostas dos alunos à questão 12.

Respostas à questão 12	Período
------------------------	---------

"Incandescente - emite luz branca. Fluorescente - absorve e emite luz quando não há fonte (escuro). LED - precisa de energia direta."	<b>1</b>
"Uma lâmpada de LED gasta muito menor energia para se manter ligada, diferente das incandescentes e fluorescentes. Um laser é um raio de luz carregado de energia."	<b>1</b>
"Incandescente é pelo aquecimento de um material metálico, fluorescente é pela excitação de um composto de flúor, LED é a excitação de um gás nobre e laser um raio unidirecional de fótons com comprimento de onda próximo ao infravermelho."	<b>1</b>
"Acredito que a diferença está no mecanismo químico, a lâmpada incandescente possui um filamento de tungstênio, que produz a energia, luz quando sofre a passagem da corrente elétrica. Entre os objetos citados, o que os diferencia também é a ddp existente em cada um deles."	<b>2</b>
"A incandescente produz luz pelo aquecimento gerado ao passar alta corrente elétrica por um filamento metálico. A fluorescente possui um gás rarefeito que excita-se com a passagem de corrente por ele e um fósforo nas paredes da lâmpada que uniformizam a sua emissão. Um LED possui compostos metálicos mistos que são excitados com a passagem de pouca corrente. LASER eu não sei."	<b>5</b>
"Não sei. Nunca escutei de nenhum professor da graduação o conceito desses termos."	<b>6</b>
"Uma lâmpada incandescente emite luz devido à temperatura do seu filamento. Uma lâmpada fluorescente é pintada com um material que ao ser excitado por uma radiação UV, volta ao seu estado fundamental emitindo luz na região do visível. Um LED é um diodo que deixa passar corrente elétrica em apenas um sentido, cada cor de LED é feita de um material diferente, mas como ocorre a emissão de luz, eu não sei. Um laser é uma onda eletromagnética de comprimento de onda específico que é amplificado através de múltiplas reflexões, de forma que seus picos se justapõem, amplificando o sinal."	<b>6</b>
"Uma lâmpada incandescente transforma elétrica em térmica e ilumina com o seu brilho; uma lâmpada fluorescente ilumina pela excitação de um gás contido em seu interior."	<b>6</b>
"Não sei diferenciá-las"	<b>7</b>
"Não sei responder."	<b>8</b>
"Incandescente -> aquecimento de um filamento de tungstênio que transforma esta energia em luz visível. Fluorescente -> um gás inerte recebe uma descarga (?) elétrica, gerando uma radiação UV que é absorvida pelo fósforo depositado nas paredes da lâmpada, emitindo luz. LED -> não sei. LASER -> não sei."	<b>8</b>

"Incandescente: o filamento metálico da lâmpada recebe energia elétrica que realiza a excitação dos elétrons que ao decair emitem luz. Fluorescente: a lâmpada é preenchida por um gás que ao sofrer uma DDP vai para o estado excitado e em seu processo de decaimento emite luz. LED: é um semicondutor que emite luz ao realizar uma transição entre sua banda de condução e sua banda de valência. LASER: produzido no processo de amplificação da intensidade de um feixe luminoso."	<b>9</b>
"Na lâmpada incandescente um gás é excitado pelos fótons emitidos pelo filamento energizado de metal, com uma grande perda de energia como calor. Na fluorescente um gás que fluoresce preenche a lâmpada."	<b>9</b>
"Lâmpada incandescente - filamento metálico."	<b>10</b>
"Essas diferenças eu não sou capaz de detalhar sem ter estudado mais afundo."	<b>11</b>
"A lâmpada incandescente possui um filamento metálico, que pela aplicação de uma corrente, produz calor e luz. A lâmpada fluorescente possui vapor de mercúrio, que ao ser aplicada uma corrente, o vapor emite no UV e isso dá energia suficiente para que os sais na superfície da lâmpada fluoresçam. A lâmpada de LED é um diodo que emite luz."	<b>12</b>
"Incandescente - lâmpada com mais alto consumo e alto aquecimento do fio de tungstênio. Fluorescente - menor consumo de energia, com menor dissipação de calor, presença de um gás que emite radiação. LED - não há dissipação de calor, formado com semicondutores. LASER - desconheço o funcionamento."	<b>12</b>
"A lâmpada incandescente além de liberar luz, libera também calor, a fluorescente libera somente luz."	<b>13</b>
"Na lâmpada incandescente o aquecimento dos átomos que a compõem gera a luminosidade, a energia elétrica é transformada em energia térmica e luz. Na lâmpada fluorescente ocorre a excitação das moléculas que a compõem e no retorno para o estado fundamental ocorre emissão de luz visível. Um LED é um diodo capaz de emitir luz em determinadas cores a depender da dopagem. Não sei sobre o laser."	<b>14</b>

Tabela A 5. Respostas dos alunos à questão 13.

<b>Respostas à questão 13</b>	<b>Período</b>
"Radiações na região do ultravioleta."	<b>1</b>
"Luz UV."	<b>1</b>
"Radiação eletromagnética de alta energia é capaz de quebrar ligações nas moléculas de DNA, isso faz com que o código genético nele seja alterado. Esse DNA que sofreu mutação	<b>1</b>

pela luz será lido e será produzido proteínas a partir dele sem as funções necessárias para o corpo."	
"A radiação ultravioleta pode alterar a estrutura da molécula de DNA, levando à deformações e consequentemente ao surgimento dos cânceres de pele."	1
"A radiação modifica os ácidos nucleicos podendo causar mutações danosas a saúde humana e o espectro é o ultravioleta."	1
"A luz ultravioleta é a responsável por provocar danos no núcleo das células, desse modo afetando no DNA dos indivíduos. A região de luz visível do espectro eletromagnético."	2
"Só sei que são os raios ultravioletas."	3
"Quebra e formação de ligações na estrutura do DNA, provocando mutações. Ultravioleta."	5
"A radiação entraria nas células do corpo fazendo com que haja mutações gerando o câncer. Na região do ultravioleta."	6
"Ultravioleta."	6
"Podemos correlacionar o comprimento de onda com energia seguindo a relação $E \propto 1/\lambda$ , ou seja, quanto menor o comprimento de onda da luz incidida, maior a energia, comprimentos na região do UV podem romper a estrutura química do DNA "forçando" uma reorganização, o que também é chamado de mutação."	6
"A região do ultravioleta que é considerada responsável pelo câncer de pele. Por ter uma energia mais alta, a radiação UV interage com a matéria, podendo provocar danos no DNA, o que causará o câncer."	6
"A radiação eletromagnética dos raios solares que possui comprimento de onda muito pequeno, ou seja, possui alta energia que é capaz de penetrar nas células do corpo humano e provocar cânceres."	6
"A região ultravioleta do espectro que corresponde a região da luz solar, mais especificamente UVA e UVB. A radiação leva as moléculas do DNA a estados mais excitados, o que pode levar a reações químicas inesperadas e não comuns ao organismo, danificando, matando ou levando a mutação de células."	7
"A região do espectro responsável seria o ultravioleta porque ele altera as moléculas do DNA."	8
"A região responsável pelos danos é UV."	8
"Ao ser exposto ao UV o DNA é levado ao estado excitado, promovendo reações no interior do mesmo ocasionando mutações que se tornam câncer."	9

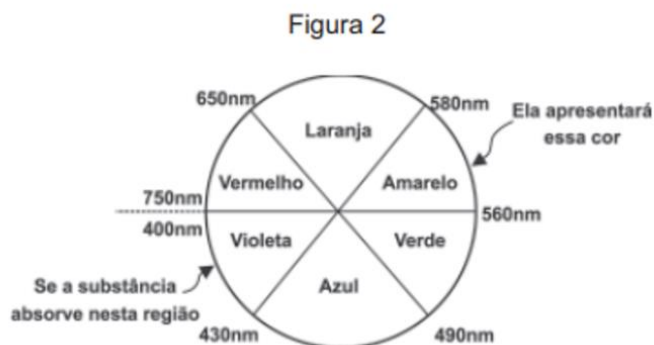
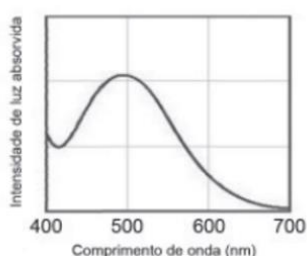
"Provoca danos por causar quebra e/ou radicalização das ligações duplas das bases nitrogenadas. Região ultravioleta."	<b>9</b>
"Não sei responder."	<b>11</b>
"A radiação que provoca danos ao DNA é a UV (280 - 400 nm)."	<b>11</b>
"A luz UV (ultravioleta) provoca uma reação de fotocicloadição na estrutura do DNA, o que modifica a sua estrutura."	<b>12</b>
"A radiação ultravioleta proveniente dos raios solares interage com as ligações entre as bases nucleotídicas do DNA, provocando o rompimento/modificações dessas ligações, que pode causar a morte da célula e/ou mutações danosas, dando origem ao câncer."	<b>12</b>
"Não sei como a radiação atua no DNA. O espectro do ultravioleta."	<b>12</b>
"A exposição a radiação eletromagnética pode provocar reações químicas que apresentam produtos danosos ao DNA. Na região do UV."	<b>14</b>

## 10. ANEXO

### QUESTÃO 68

Para que uma substância seja colorida ela deve absorver luz na região do visível. Quando uma amostra absorve luz visível, a cor que percebemos é a soma das cores restantes que são refletidas ou transmitidas pelo objeto. A Figura 1 mostra o espectro de absorção para uma substância e é possível observar que há um comprimento de onda em que a intensidade de absorção é máxima. Um observador pode prever a cor dessa substância pelo uso da roda de cores (Figura 2): o comprimento de onda correspondente à cor do objeto é encontrado no lado oposto ao comprimento de onda da absorção máxima.

Figura 1



Brown, T. Química e Ciência Central. 2005 (adaptado).

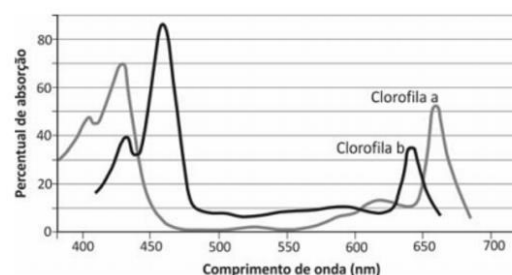
Qual a cor da substância que deu origem ao espectro da Figura 1?

- ☐ A Azul.
- ☐ B Verde.
- ☐ C Violeta.
- ☐ D Laranja.
- ☒ E Vermelho.

Figura A 1. Questão 68 do caderno amarelo do ENEM de 2011.

34

Chumaços de algodão embebidos em uma solução de vermelho de cresol, de cor rosa, foram colocados em três recipientes de vidro, I, II e III, idênticos e transparentes. Em I e II, havia plantas e, em III, rãs. Os recipientes foram vedados e iluminados durante um mesmo intervalo de tempo com luz de mesma intensidade, sendo que I e III foram iluminados com luz de frequência igual a  $7,0 \times 10^{14}$  Hz, e II, com luz de frequência igual a  $5,0 \times 10^{14}$  Hz. O gráfico mostra a taxa de fotossíntese das clorofilas a e b em função do comprimento de onda da radiação eletromagnética. Considere que, para essas plantas, o ponto de compensação fótica corresponde a 20% do percentual de absorção.



É correto afirmar que, após o período de iluminação, as cores dos chumaços de algodão embebidos em solução de cresol dos recipientes I, II e III ficaram, respectivamente,

- a) roxa, amarela e amarela.
- b) roxa, rosa e amarela.
- c) rosa, roxa e amarela.
- d) amarela, amarela e roxa.
- e) roxa, roxa e rosa.

Note e adote:  
As plantas e as rãs permaneceram vivas durante o experimento.  
As cores da solução de cresol em ambientes com dióxido de carbono com concentração menor, igual e maior que a da atmosfera são, respectivamente, roxa, rosa e amarela.  
Velocidade da luz =  $3 \times 10^8$  m/s  
 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

Figura A 2. Questão 34 da 1ª fase de conhecimentos gerais da FUVEST de 2015.



### QUESTÃO 101

A retina é um tecido sensível à luz, localizado na parte posterior do olho, onde ocorre o processo de formação de imagem. Nesse tecido, encontram-se vários tipos celulares específicos. Um desses tipos celulares são os cones, os quais convertem os diferentes comprimentos de onda da luz visível em sinais elétricos, que são transmitidos pelo nervo óptico até o cérebro.

Disponível em: [www.portaldaretina.com.br](http://www.portaldaretina.com.br). Acesso em: 13 jun. 2012 (adaptado).

Em relação à visão, a degeneração desse tipo celular irá

- A** comprometer a capacidade de visão em cores.
- B** impedir a projeção dos raios luminosos na retina.
- C** provocar a formação de imagens invertidas na retina.
- D** causar dificuldade de visualização de objetos próximos.
- E** acarretar a perda da capacidade de alterar o diâmetro da pupila.

Figura A 3. Questão 101 do caderno rosa do ENEM de 2017.

### QUESTÃO 119

Pesquisadores conseguiram estimular a absorção de energia luminosa em plantas graças ao uso de nanotubos de carbono. Para isso, nanotubos de carbono “se inseriram” no interior dos cloroplastos por uma montagem espontânea, através das membranas dos cloroplastos. Pigmentos da planta absorvem as radiações luminosas, os elétrons são “excitados” e se deslocam no interior de membranas dos cloroplastos, e a planta utiliza em seguida essa energia elétrica para a fabricação de açúcares. Os nanotubos de carbono podem absorver comprimentos de onda habitualmente não utilizados pelos cloroplastos, e os pesquisadores tiveram a ideia de utilizá-los como “antenas”, estimulando a conversão de energia solar pelos cloroplastos, com o aumento do transporte de elétrons.

**Nanotubos de carbono incrementam a fotossíntese de plantas.**  
Disponível em: <http://lqes.lqm.unicamp.br>. Acesso em: 14 nov. 2014 (adaptado).

O aumento da eficiência fotossintética ocorreu pelo fato de os nanotubos de carbono promoverem diretamente a

- A** utilização de água.
- B** absorção de fótons.
- C** formação de gás oxigênio.
- D** proliferação dos cloroplastos.
- E** captação de dióxido de carbono.

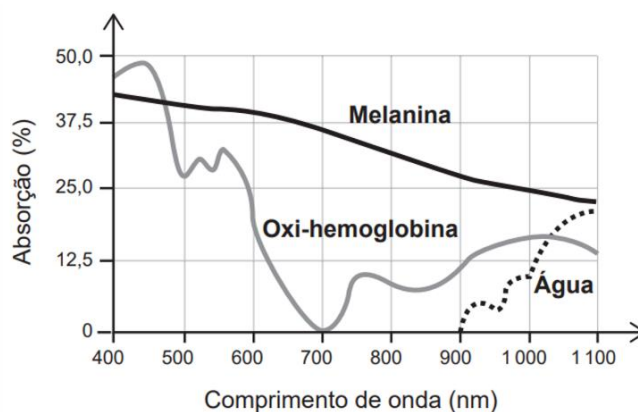
Figura A 4. Questão 119 do caderno rosa do ENEM de 2017.

**QUESTÃO 121**

A epilação a *laser* (popularmente conhecida como depilação a *laser*) consiste na aplicação de uma fonte de luz para aquecer e causar uma lesão localizada e controlada nos folículos capilares. Para evitar que outros tecidos sejam danificados, selecionam-se comprimentos de onda que são absorvidos pela melanina presente nos pelos, mas que não afetam a oxi-hemoglobina do sangue e a água dos tecidos da região em que o tratamento será aplicado. A figura mostra como é a absorção de diferentes comprimentos de onda pela melanina, oxi-hemoglobina e água.

Qual é o comprimento de onda, em nm, ideal para a epilação a *laser*?

- A 400
- B 700
- C 1 100
- D 900
- E 500

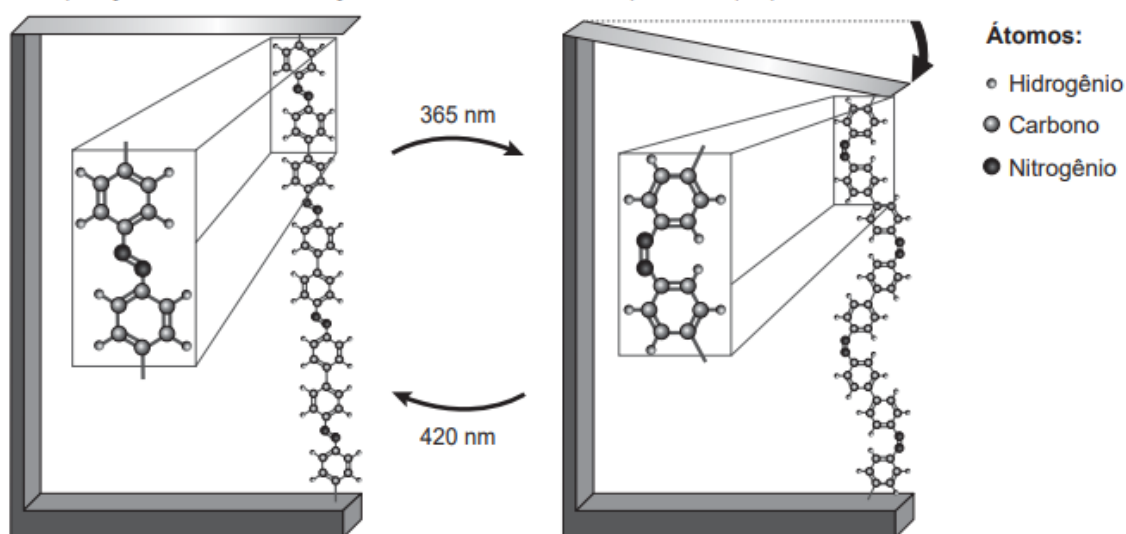


MACEDO, F. S.; MONTEIRO, E. O. Epilação com *laser* e luz intensa pulsada. *Revista Brasileira de Medicina*. Disponível em: [www.moreirajr.com.br](http://www.moreirajr.com.br). Acesso em: 4 set. 2015 (adaptado).

Figura A 5. Questão 121 do caderno rosa do ENEM de 2017.

**QUESTÃO 91**

Pesquisas demonstram que nanodispositivos baseados em movimentos de dimensões atômicas, induzidos por luz, poderão ter aplicações em tecnologias futuras, substituindo micromotores, sem a necessidade de componentes mecânicos. Exemplo de movimento molecular induzido pela luz pode ser observado pela flexão de uma lâmina delgada de silício, ligada a um polímero de azobenzeno e a um material suporte, em dois comprimentos de onda, conforme ilustrado na figura. Com a aplicação de luz ocorrem reações reversíveis da cadeia do polímero, que promovem o movimento observado.



TOMA, H. E. A nanotecnologia das moléculas. *Química Nova na Escola*, n. 21, maio 2005 (adaptado).

O fenômeno de movimento molecular, promovido pela incidência de luz, decorre do(a)

- A movimento vibracional dos átomos, que leva ao encurtamento e à relaxação das ligações.
- B isomerização das ligações N=N, sendo a forma cis do polímero mais compacta que a trans.
- C tautomerização das unidades monoméricas do polímero, que leva a um composto mais compacto.
- D ressonância entre os elétrons  $\pi$  do grupo azo e os do anel aromático que encurta as ligações duplas.
- E variação conformacional das ligações N=N, que resulta em estruturas com diferentes áreas de superfície.

Figura A 6. Questão 91 do caderno azul do ENEM de 2018.

### QUESTÃO 102

O sulfeto de mercúrio(II) foi usado como pigmento vermelho para pinturas de quadros e murais. Esse pigmento, conhecido como *vermilion*, escurece com o passar dos anos, fenômeno cuja origem é alvo de pesquisas. Aventou-se a hipótese de que o *vermilion* seja decomposto sob a ação da luz, produzindo uma fina camada de mercúrio metálico na superfície. Essa reação seria catalisada por íon cloreto presente na umidade do ar.

WOGAN, T. *Mercury's Dark Influence on Art*. Disponível em: [www.chemistryworld.com](http://www.chemistryworld.com). Acesso em: 26 abr. 2018 (adaptado).

Segundo a hipótese proposta, o íon cloreto atua na decomposição fotoquímica do *vermilion*

- A** reagindo como agente oxidante.
- B** deslocando o equilíbrio químico.
- C** diminuindo a energia de ativação.
- D** precipitando cloreto de mercúrio.
- E** absorvendo a energia da luz visível.

Figura A 7. Questão 102 do caderno azul do ENEM de 2018.

### Questão 105

Um teste de laboratório permite identificar alguns cátions metálicos ao introduzir uma pequena quantidade do material de interesse em uma chama de bico de Bunsen para, em seguida, observar a cor da luz emitida.

A cor observada é proveniente da emissão de radiação eletromagnética ao ocorrer a

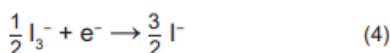
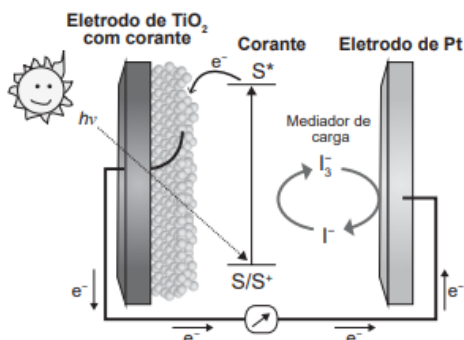
- A** mudança da fase sólida para a fase líquida do elemento metálico.
- B** combustão dos cátions metálicos provocada pelas moléculas de oxigênio da atmosfera.
- C** diminuição da energia cinética dos elétrons em uma mesma órbita na eletrosfera atômica.
- D** transição eletrônica de um nível mais externo para outro mais interno na eletrosfera atômica.
- E** promoção dos elétrons que se encontram no estado fundamental de energia para níveis mais energéticos.

Figura A 8. Questão 105 do caderno azul do ENEM de 2018.



### QUESTÃO 116

Células solares à base de  $\text{TiO}_2$  sensibilizadas por corantes (S) são promissoras e poderão vir a substituir as células de silício. Nessas células, o corante adsorvido sobre o  $\text{TiO}_2$  é responsável por absorver a energia luminosa ( $h\nu$ ), e o corante excitado ( $\text{S}^*$ ) é capaz de transferir elétrons para o  $\text{TiO}_2$ . Um esquema dessa célula e os processos envolvidos estão ilustrados na figura. A conversão de energia solar em elétrica ocorre por meio da sequência de reações apresentadas.



LONGO, C.; DE PAOLI, M.-A. Dye-Sensitized Solar Cells: A Successful Combination of Materials. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, n. 6, 2003 (adaptado).

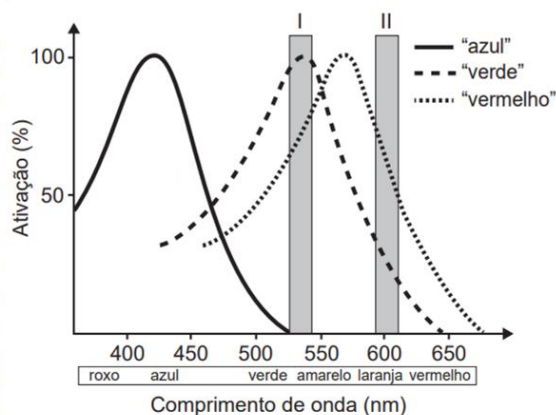
A reação 3 é fundamental para o contínuo funcionamento da célula solar, pois

- A reduz íons  $\text{I}^-$  a  $\text{I}_3^-$ .
- B regenera o corante.
- C garante que a reação 4 ocorra.
- D promove a oxidação do corante.
- E transfere elétrons para o eletrodo de  $\text{TiO}_2$ .

Figura A 9. Questão 116 do caderno azul do ENEM de 2018.

### QUESTÃO 129

Muitos primatas, incluindo nós humanos, possuem visão tricromática: têm três pigmentos visuais na retina sensíveis à luz de uma determinada faixa de comprimentos de onda. Informalmente, embora os pigmentos em si não possuam cor, estes são conhecidos como pigmentos "azul", "verde" e "vermelho" e estão associados à cor que causa grande excitação (ativação). A sensação que temos ao observar um objeto colorido decorre da ativação relativa dos três pigmentos. Ou seja, se estimulássemos a retina com uma luz na faixa de 530 nm (retângulo I no gráfico), não excitaríamos o pigmento "azul", o pigmento "verde" seria ativado ao máximo e o "vermelho" seria ativado em aproximadamente 75%, e isso nos daria a sensação de ver uma cor amarelada. Já uma luz na faixa de comprimento de onda de 600 nm (retângulo II) estimularia o pigmento "verde" um pouco e o "vermelho" em cerca de 75%, e isso nos daria a sensação de ver laranja-avermelhado. No entanto, há características genéticas presentes em alguns indivíduos, conhecidas coletivamente como Daltonismo, em que um ou mais pigmentos não funcionam perfeitamente.



Disponível em: [www.comprehensivephysiology.com](http://www.comprehensivephysiology.com). Acesso em: 3 ago. 2012 (adaptado).

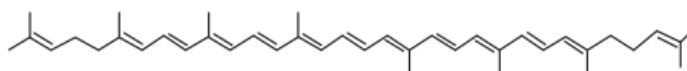
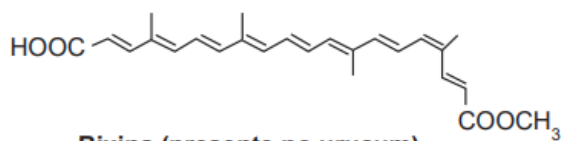
Caso estimulássemos a retina de um indivíduo com essa característica, que não possuísse o pigmento conhecido como "verde", com as luzes de 530 nm e 600 nm na mesma intensidade luminosa, esse indivíduo seria incapaz de

- A identificar o comprimento de onda do amarelo, uma vez que não possui o pigmento "verde".
- B ver o estímulo de comprimento de onda laranja, pois não haveria estimulação de um pigmento visual.
- C detectar ambos os comprimentos de onda, uma vez que a estimulação dos pigmentos estaria prejudicada.
- D visualizar o estímulo do comprimento de onda roxo, já que este se encontra na outra ponta do espectro.
- E distinguir os dois comprimentos de onda, pois ambos estimulam o pigmento "vermelho" na mesma intensidade.

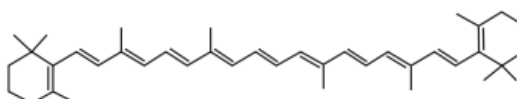
Figura A 10. Questão 129 do caderno azul do ENEM de 2018.

**Questão 120**

A utilização de corantes na indústria de alimentos é bastante difundida e a escolha por corantes naturais vem sendo mais explorada por diversas razões. A seguir são mostradas três estruturas de corantes naturais.



**Licopeno (presente no tomate)**



**$\beta$ -caroteno (presente na cenoura e na laranja)**

HAMERSKI, L.; REZENDE, M. J. C.; SILVA, B. V. Usando as cores da natureza para atender aos desejos do consumidor: substâncias naturais como corantes na indústria alimentícia. **Revista Virtual de Química**, n. 3, 2013.

A propriedade comum às estruturas que confere cor a esses compostos é a presença de

- A** cadeia conjugada.
- B** cadeia ramificada.
- C** átomos de carbonos terciários.
- D** ligações duplas de configuração cis.
- E** átomos de carbonos de hibridação  $sp^3$ .

Figura A 11. Questão 120 do caderno azul do ENEM de 2019.

Table I.7.1 **Summary description of the seven levels of science proficiency in PISA 2018**

Level	Lower score limit	Percentage of students able to perform tasks at each level or above (OECD average)	Characteristics of tasks
<b>6</b>	<b>708</b>	<b>0.8%</b>	At Level 6, students can draw on a range of interrelated scientific ideas and concepts from the physical, life, and earth and space sciences and use content, procedural and epistemic knowledge in order to offer explanatory hypotheses of novel scientific phenomena, events and processes or to make predictions. In interpreting data and evidence, they are able to discriminate between relevant and irrelevant information and can draw on knowledge external to the normal school curriculum. They can distinguish between arguments that are based on scientific evidence and theory and those based on other considerations. Level 6 students can evaluate competing designs of complex experiments, field studies or simulations and justify their choices.
<b>5</b>	<b>633</b>	<b>6.8%</b>	At Level 5, students can use abstract scientific ideas or concepts to explain unfamiliar and more complex phenomena, events and processes involving multiple causal links. They are able to apply more sophisticated epistemic knowledge to evaluate alternative experimental designs and justify their choices, and use theoretical knowledge to interpret information or make predictions. Level 5 students can evaluate ways of exploring a given question scientifically and identify limitations in interpretations of data sets, including sources and the effects of uncertainty in scientific data.
<b>4</b>	<b>559</b>	<b>24.9%</b>	At Level 4, students can use more complex or more abstract content knowledge, which is either provided or recalled, to construct explanations of more complex or less familiar events and processes. They can conduct experiments involving two or more independent variables in a constrained context. They are able to justify an experimental design by drawing on elements of procedural and epistemic knowledge. Level 4 students can interpret data drawn from a moderately complex data set or less familiar context, draw appropriate conclusions that go beyond the data and provide justifications for their choices.
<b>3</b>	<b>484</b>	<b>52.3%</b>	At Level 3, students can draw upon moderately complex content knowledge to identify or construct explanations of familiar phenomena. In less familiar or more complex situations, they can construct explanations with relevant cueing or support. They can draw on elements of procedural or epistemic knowledge to carry out a simple experiment in a constrained context. Level 3 students are able to distinguish between scientific and non-scientific issues and identify the evidence supporting a scientific claim.
<b>2</b>	<b>410</b>	<b>78.0%</b>	At Level 2, students are able to draw on everyday content knowledge and basic procedural knowledge to identify an appropriate scientific explanation, interpret data and identify the question being addressed in a simple experimental design. They can use basic or everyday scientific knowledge to identify a valid conclusion from a simple data set. Level 2 students demonstrate basic epistemic knowledge by being able to identify questions that can be investigated scientifically.
<b>1a</b>	<b>335</b>	<b>94.1%</b>	At Level 1a, students are able to use basic or everyday content and procedural knowledge to recognise or identify explanations of simple scientific phenomena. With support, they can undertake structured scientific enquiries with no more than two variables. They are able to identify simple causal or correlational relationships and interpret graphical and visual data that require a low level of cognitive demand. Level 1a students can select the best scientific explanation for given data in familiar personal, local and global contexts.
<b>1b</b>	<b>261</b>	<b>99.3%</b>	At Level 1b, students can use basic or everyday scientific knowledge to recognise aspects of familiar or simple phenomena. They are able to identify simple patterns in data, recognise basic scientific terms and follow explicit instructions to carry out a scientific procedure.

Figura A 12. Tabela com os níveis de proficiência em Ciências do PISA de 2018. Fonte:

*PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do*

(<https://doi.org/10.1787/5f07c754-en>).

## Snapshot of performance trends in BRAZIL

Mean performance	Reading	Mathematics	Science
PISA 2000	396*		
PISA 2003	403	356*	
PISA 2006	393*	370*	390*
PISA 2009	412	386	405
PISA 2012	407	389	402
PISA 2015	407	377	401
PISA 2018	413	384	404
Average 3-year trend in mean performance	+2.6	+4.6*	+2.2
Short-term change in mean performance (2015 to 2018)	+5.5	+6.5	+2.9
Overall performance trajectory	flat	positive, but flattening (less positive over more recent years)	hump-shaped (more negative over more recent years)
Proficiency levels	Reading (2009 to 2018)	Mathematics (2012 to 2018)	Science (2006 to 2018)
Percentage-point change in top-performing students (Level 5 or 6)	+0.5	+0.2	+0.2
Percentage-point change in low-achieving students (below Level 2)	+0.4	-0.2	-5.6*
Variation in performance	Reading (2000 to 2018)	Mathematics (2003 to 2018)	Science (2006 to 2018)
Average trend amongst the highest-achieving students (90th percentile)	+4.0*	+2.6	+4.0*
Average trend amongst the lowest-achieving students (10th percentile)	+2.6	+7.4*	+1.2
Gap in learning outcomes between the highest- and lowest-achieving students	widening gap	narrowing gap	stable gap

\* indicates statistically significant trends and changes, or mean-performance estimates that are significantly above or below PISA 2018 estimates.

Source: OECD, PISA 2018 Database, Tables I.B1.7–I.B1.15 and I.B1.28–I.B1.30.

Figura A 13. Tabela com performances do Brasil no PISA de 2000 a 2018. Fonte: *PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do* (<https://doi.org/10.1787/5f07c754-en>).